ANNALES

DES

PONTS ET CHAUSSÉES.

MÉMOIRES ET DOCUMENTS.

5e SÉRIE.

TOME XVIII.

1879

2me SEMESTRE.

PARIS. — IMPRIMERIE ARNOUS DE RIVIÈRE
Rue Racine, 26, près de l'Odéon.

ANNALES

DES

PONTS ET CHAUSSÉES.

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

RELATIFS

A L'ART DES CONSTRUCTIONS

ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR;

LOIS, DÉCRETS, ARRÊTÉS ET AUTRES ACTES

CONCERNANT

L'ADMINISTRATION DES PONTS ET CHAUSSÉES.

MÉMOIRES ET DOCUMENTS.

5e SÉRIE.

TOME XVIII.

1879

2me SEMESTRE.

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR,

LIBRAIRIE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

Quai des Augustins, n° 49.

ANNALES

DES

PONTS ET CHAUSSÉES.

MÉMOIRES ET DOCUMENTS

RELATIFS

A L'ART DES CONSTRUCTIONS

ET AU SERVICE DE L'INGÉNIEUR.

N° 37

PRIX DÉCERNÉS

PAR DÉCISION MINISTÉRIELLE DU 25 JUIN 1879,

conformément à la circulaire du directeur général des ponts et chaussées du 28 janvier 1835,

AUX AUTEURS

des meilleurs mémoires publiés dans les Annales des ponts et chaussées

EN **1877.**

MÉDAILLE D'OR DE 600 FRANCS

A M. Lavoinne, ingénieur en chef des ponts et chaussées, pour sa *Notice sur la construction du pont de Saint-Louis sur le Mississipi, en* 1868-1874.

MÉDAILLES D'OR DE 300 FRANCS :

1° A M. Dupuy, ingénieur en chef des ponts et chaussées, pour

sa *Note sur un appareil destiné à mesurer directement le travail du fer;*

2° A M. **Decœur**, ingénieur ordinaire des ponts et chaussées, pour son *Mémoire sur de nouveaux types de turbines et de pompes centrifuges;*

3° A M. **Pelletreau**, ingénieur ordinaire des ponts et chaussées, pour son *Mémoire sur la résistance des murs qui supportent une poussée d'eau.*

N° 38

NOTE

SUR

LES CHEMINS DE FER DE MONTAGNE

ET EN PARTICULIER

SUR LES CHEMINS DE FER A CRÉMAILLÈRE

Par M. A. PICARD, ancien élève de l'École polytechnique,
Inspecteur du Mouvement aux chemins de fer de l'Est.

La Commission des *Annales* a bien voulu accueillir, en 1875 (1er semestre, t. IX, p. 221), un extrait que nous lui avons envoyé d'une communication sur les chemins de fer de montagne faite par M. Carl Maader, le 11 août 1874, à l'Union des ingénieurs et architectes autrichiens, à Vienne.

Nous revenons aujourd'hui sur le même sujet, pensant que les lecteurs des *Annales* pourront trouver quelque intérêt à être tenus au courant du développement de ces chemins de fer exceptionnels, des progrès réalisés dans leur construction et des résultats fournis par l'exploitation de quelques-uns d'entre eux (*).

(*) Les principales sources auxquelles nous avons puisé nos renseignements sont les suivantes :

Pour le chemin d'Ouchy à Lausanne;

— Un article de M. l'ingénieur G. Meissner, publié par l'*Organ für Fortschritte des Eisenbahnwesens* (1877, 1re livraison);

Pour le chemin de l'Uetliberg:

— Une brochure de M. l'ingénieur Tobler, intitulée: *Die Uetlibergbahn* (Zurich, 1876);

— Les rapports aux actionnaires de la compagnie du chemin de fer de l'Uetliberg;

Pour les chemins à crémaillère;

— Une brochure de M. R. Abt, ingénieur des ateliers de con-

I. — CHEMINS A MOTEUR FIXE ET A TRACTION FUNICULAIRE.

Chemin d'Ouchy à Lausanne (Suisse). — Nous n'avons à citer qu'un seul exemple de chemin de fer récemment établi avec moteur fixe et traction funiculaire : c'est la ligne qui relie la ville de Lausanne au port d'Ouchy, sur le lac de Genève. Les études pour mettre ces deux points en communication par une voie ferrée ont coïncidé avec celles qui avaient pour but une distribution d'eau dans la ville de Lausanne, et le choix du système a été naturellement déterminé par la possibilité qu'on a reconnue de disposer, à la station supérieure, d'une force hydraulique considérable mesurée par 145 mètres de chute.

Le chemin a été ouvert le 15 mars 1877 ; il est en ligne droite et présente une longueur de 1.496 mètres, avec des rampes dont l'inclinaison atteint 116 millimètres par mètre. Il passe en souterrain sous la station du chemin de fer de la Suisse occidentale et sous un quartier de la ville dont les maisons ont éprouvé, pendant les travaux, des ébranlements qui ont donné lieu à de nombreuses demandes de dommages et intérêts. Aussi la dépense de construction s'est-elle élevée à un chiffre considérable qu'un ingénieur suisse, M. O. Zschokke évalue à environ 3 millions de francs (*).

---

struction d'Aarau, intitulée : *Die Drei Rigibahnen und das Zahnrad system* (Zurich, 1877) ;

— Une étude sur les chemins de fer à crémaillère, écrite par le même ingénieur, pour le *Handbuch für spezielle Eisenbahn Technik* publié par M. *Heuzinger von Waldegg;*

— Les rapports aux actionnaires de la compagnie du chemin de fer de Vitznau au Rigi ;

— Et plusieurs autres documents que je dois à MM. N. Riggenbach et R. Abt, à qui j'adresse tous mes remerciements pour leur inépuisable obligeance.

(*) Dans une brochure sur l'exploitation des chemins de fer suisses sous la direction de la Confédération.

Ce plan incliné est automoteur; il est donc construit à deux voies, sur lesquelles circulent deux trains semblables, suspendus aux extrémités d'un câble enroulé, à la station supérieure, autour d'un tambour moteur. Le tambour a 6 mètres de diamètre et reçoit deux spires de câble; il est mis en relation par des engrenages avec un arbre horizontal qui porte deux turbines *Girard* disposées de manière à produire des rotations de sens inverse. L'eau arrive alternativement à l'une et à l'autre de ces turbines, pour faire monter la rampe à l'un et à l'autre train; la turbine qui ne travaille pas, pendant la montée de l'un des trains, tourne à vide avec l'arbre, puis fonctionne à son tour. L'eau est amenée par une conduite de 400 mètres de longueur, dont les frottements réduisent la hauteur de chute à 120 mètres; la consommation d'eau est de $0^{mc},16$ par seconde.

Le câble est composé de 6 torons formés chacun de 8 fils d'acier de 3 millimètres de diamètre; son diamètre est de 30 millimètres; sa section, de 336 millimètres carrés; son poids, de $2^{k},5$ par mètre courant.

Un train pèse 35 *tonnes;* en ajoutant à ce chiffre le poids des 1.500 mètres de câble, soit 3.750 kilog., on obtient un poids total de 38.750 kilog., en chiffres ronds 40 *tonnes*. La voie étant à sa partie inférieure en rampe d'inclinaison un peu inférieure à 100 millimètres par mètre, on voit que la composante parallèle à la voie qui tend le câble, au moment du démarrage, peut être regardée comme égale à 4.000 kilog., en ayant égard au frottement sur les poulies. Le câble a donc à supporter un effort, par millimètre carré, de $\frac{4.000}{336} = 12$ kilog., c'est-à-dire $\frac{1}{8^e}$ seulement de sa charge de rupture (*).

(*) Il importe de remarquer que M. G. Meissner, à qui nous empruntons ce calcul, n'a pas tenu compte du travail développé par la flexion du câble, travail difficile à évaluer, mais dans tous les

Plan incliné d'Hopton (système Handyside). — Les *Annales* ont donné en 1877 (1er semestre, p. 395) une description, à laquelle nous renvoyons le lecteur, d'un système particulier employé à l'exploitation du plan incliné d'Hopton, sur le London and North Western, et qui tient le milieu entre les chemins à moteur fixe et à traction funiculaire et les chemins à locomotives.

Ce système consiste à remorquer les trains avec une machine-tender qui, arrivée au pied de la rampe, la gravit seule en déroulant un câble accroché au train, puis s'attache sur la voie à l'aide de freins particuliers, et, ainsi transformée en machine fixe, attire à elle les wagons en enroulant de nouveau le câble sur un tambour mû par des cylindres spéciaux. Une Notice, distribuée à l'Exposition universelle de 1878 par le constructeur de la locomotive Handyside, nous apprend que des machines de ce système ont été fournies aux gouvernements anglais et russe, ainsi qu'à plusieurs compagnies particulières, à des entrepreneurs, etc.

II. — CHEMINS A LOCOMOTIVES.

§ 1er. — CHEMINS DE MONTAGNE A SIMPLE ADHÉRENCE.

Certaines lignes de chemin de fer, qui ne présentent aucune disposition spéciale dans la construction de la voie et de leurs machines, méritent d'être classées parmi les chemins de montagne, en raison de la raideur inusitée de leurs rampes. Les lignes de Rigi-Kaltbad à Rigi-Scheideck et de l'Uetliberg, récemment construites en Suisse, appartiennent à cette catégorie. Nous en dirons quelques mots avant de

---

cas assez considérable pour que la somme des efforts auxquels est soumis le câble soit, en réalité, très-supérieure à la valeur indiquée ci-dessus.

passer à l'examen des chemins de montagne à locomotives spéciales.

Chemin de Rigi-Kaltbad à Rigi-Scheideck. — La ligne de Rigi-Kaltbad (station de la ligne à crémaillère de Vitznau au Rigi) à Rigi-Scheideck, ouverte à la circulation depuis l'été de 1875, a $6^{km},72$ de longueur; son tracé présente des rampes qui atteignent 50 millimètres par mètre, et des courbes de 100 à 120 mètres de rayon (*voir* Pl. 16, *fig.* 1, le profil de cette ligne). Elle appartient à une société particulière qui est aussi propriétaire des grands hôtels du Rigi; mais l'exploitation en est assurée par la compagnie de Vitznau au Rigi. Les machines, du poids de 20 tonnes, à trois essieux accouplés, peuvent y remorquer un train de trois voitures à 55 places, représentant, toutes les places étant occupées, un poids d'environ 24 tonnes.

Le capital de premier établissement, comprenant les frais d'acquisition du matériel roulant, s'élève à la somme de 1.350.000 francs, ce qui fait environ 200.000 francs par kilomètre. En 1875, l'exploitation de ce chemin avait fourni les résultats suivants :

Recettes :

Voyageurs (19.905 personnes). .	38.702 fr.	
Bagages (974 tonnes).	3.592 —	
Marchandises (7.939 tonnes). . .	6.070 —	
Total.	49.064 fr. . .	49.064 fr.

Dépenses :

Administration générale.	3.093 fr.	
Service de la voie.	7.103 —	
— de l'exploitation.	5.573 —	
— du matériel et de la traction.	16.267 —	
Total.	32.036 fr. . .	32.036 fr.
Excédant des recettes sur les dépenses. . .		17.028 fr.

Les dépenses représentent 65,3 p. 100 des recettes brutes, et les recettes nettes 1,26 p. 100 du capital.

Chemin de l'Uetliberg. — L'Uetliberg est une montagne voisine de la ville de Zurich, dont le sommet, élevé de 460 mètres au-dessus du niveau du lac et offrant de beaux points de vue, sert de but d'excursions aux habitants de la ville et pendant l'été aux touristes.

La construction d'une ligne de chemin de fer allant de Zurich au sommet de la montagne fut décidée au commencement de 1872, et l'on résolut de s'en rapporter, pour le choix du système d'exploitation à adopter, à l'avis d'une commission composée de MM. Culmann et Pestalozzi, professeurs à l'École polytechnique de Zurich, et Tobler, ingénieur en chef.

La disposition du terrain n'était pas favorable à l'emploi de la crémaillère : celle-ci, en effet, eût été complétement inutile entre la ville et le pied de la montagne, sur une longueur d'environ 3 kilomètres, qui pouvait être franchie avec des rampes d'inclinaison moyenne; le flanc de la montagne, au contraire, était tout à fait abrupt et nécessitait un profil spécial sur lequel la crémaillère eût pu être avantageuse. En cas d'adoption du système à crémaillère, il aurait donc fallu, soit remorquer les trains pendant la première partie de leur parcours avec une machine à simple adhérence, soit laisser circuler la machine à roue dentée d'un bout à l'autre de la ligne. Ces deux solutions furent jugées inadmissibles, la première, parce qu'elle aurait compliqué le service et augmenté la dépense en exigeant des machines de deux systèmes différents, et la seconde, parce qu'on craignit que l'emploi exclusif de la machine à roue dentée n'obligeât à adopter, sur la portion de voie sans crémaillère, une vitesse de marche trop réduite.

La voie à crémaillère fut donc repoussée et la commission recommanda l'adoption de la voie à simple adhérence, en fixant la limite des rampes à 75 millimètres, inclinaison sur laquelle, d'après ses calculs, une machine à deux essieux couplés, du poids de 18 tonnes, devait pouvoir remor-

quer, à la vitesse de 19 kilomètres à l'heure, un train composé de deux voitures à 40 places, pesant chacune 8 tonnes, chargement compris.

Dans l'exécution, on n'a pas dépassé l'inclinaison de 70 millimèt., qui se rencontre seulement sur une longueur de 810 mètres à l'arrivée au sommet (*voir* le profil en long, Pl. 16, *fig.* 2). Le rayon minimum des courbes a été fixé à 150 mètres sur la rampe de 70 millimètres, mais on a dû descendre au rayon de 135 mètres sur un point en rampe de 67 millimètres.

La ligne, à voie unique et à largeur normale, est construite en rails Vignole pesant 30 kilog. par mètre courant, mesure une longueur totale de 9^{km},167, et rachète une hauteur de 401^{m},5. Comme ouvrages d'art, il n'y a qu'un pont par-dessus le chemin de fer de la rive du lac et un pont métallique sur la Sihl, à trois travées, d'une longueur totale de 68 mètres.

Les frais de premier établissement du chemin de l'Uetliberg se soldaient au 31 décembre 1877 par une dépense de $1.674.573^{f}$,96, dont voici le détail :

		francs.
Administration générale.		52.322,16
Études préparatoires.		44,851,71
Acquisitions de terrains.		266.982,94
Construction de la ligne :		
	francs.	
Frais généraux.	41.056.13	
Infrastructure.	575.991,00	
Superstructure.	318.216,13	
Stations.	50.039,06	
	985.302,32. . . .	985.302,32
Matériel roulant (4 machines, 9 voitures et 3 wagons) et mobilier		262.953,20
Intérêts pendant la construction.		62.161,63
Total.		1.674 573,96

Ce chiffre représente une dépense kilométrique de 183.000 francs; si l'on ne compte pas le matériel roulant, le prix par kilomètre devient égal à 177.000 francs.

Les locomotives en service sur le chemin de l'Uetliberg sont des machines-tenders à 3 essieux couplés. Voici leurs principales dimensions :

Diamètre du cylindre.	$0^m,32$
Course du piston	$0^m,54$
Diamètre des roues.	$0^m,91$
Écartement des essieux extrêmes. . . .	$2^m,00$
Surface de chauffe.	72^{m2}
Surface de grille.	1^{m2}
Pression de la vapeur.	10 à 12 atm.
Poids à vide.	19 tonnes.
Poids en service.	24 à 25 tonnes.

La consommation de combustible varie, d'après les rapports aux actionnaires, entre $10^k,4$ et 12 kilog. par kilomètre. Mais ce chiffre se rapporte à l'ensemble des kilomètres parcourus, et, comme on ne consomme rien ou presque rien à la descente, il faut compter environ 20 kilog. par kilomètre à la montée.

Bien que le chemin de fer de l'Uetliberg ne soit qu'un chemin de promenade, l'exploitation en est permanente, sans interruption pendant l'hiver; seulement, le service, qui comprend pendant les mois d'été six trains réguliers dans chaque sens, sans compter les trains supplémentaires, se réduit pendant la mauvaise saison à un ou deux trains aller et retour.

La durée du trajet est de 30 minutes dans un sens comme dans l'autre. A la descente, on fait usage, pour modérer la vitesse, du frein à air appliqué par M. Riggenbach aux machines du Rigi, et depuis à toutes les machines à roue dentée (nous en donnons plus loin la description sommaire à propos de ces dernières machines). En outre, les roues d'avant et d'arrière des machines peuvent être enrayées au moyen d'un frein manœuvré par un levier qui donne une grande rapidité de serrage; ce frein, ainsi que ceux des véhicules, qui en sont tous pourvus, ne doivent être employés que pour les arrêts.

Les trains sont composés de deux ou trois voitures à 40 places, suivant les besoins. Au début, on ne modifiait jamais la composition pour la descente, et la machine retenait en descendant les wagons qu'elle avait remorqués à la montée. Mais, afin d'éviter de faire des trains supplémentaires les jours de grande affluence pour ramener les voyageurs à Zurich dans la soirée, on a décidé, depuis un an, que pendant la journée les trains partant de la station d'Uetliberg ne prendraient que le nombre de voitures strictement nécessaire, les autres restant à la station pour servir à renforcer la composition des trains du soir. Ces derniers peuvent donc se trouver composés de quatre voitures ou plus, ce qui représente une charge bien supérieure à celle que la machine peut remorquer à la montée et retenir à la descente au moyen du frein à air; on est donc obligé, dans ce cas, d'enrayer un certain nombre d'essieux pour ne pas se laisser gagner de vitesse. Bien que chaque véhicule soit muni d'un frein capable de le maintenir immobile sur la rampe, il est évident que la descente d'un train ainsi composé présente des dangers sérieux, et qu'il vaudrait bien mieux accepter la dépense et les inconvénients des trains supplémentaires plutôt que de s'exposer à un accident dont les conséquences seraient épouvantables.

L'exploitation du chemin de l'Uetliberg, qui n'en est qu'à sa troisième année, n'a pas donné jusqu'ici de bons résultats. Ceci tient en partie au mauvais temps qui a régné pendant les étés de 1876 et 1877, et dont la fâcheuse influence s'est fait sentir sur les recettes des diverses lignes suisses consacrées aux excursions des touristes.

Nous avons résumé dans le tableau ci-dessous les comptes d'exploitation du chemin de fer de l'Uetliberg, d'après les renseignements fournis par les rapports aux actionnaires :

Trafic et résultats de l'exploitation d[u]

ANNÉES.	TRAFIC ET RECETTES D'EXPLOITATION.								
	VOYAGEURS.		BAGAGES.		MARCHANDISES.		Recettes indirectes d'exploitation.	RECETTES BRUTES	
	Nombre.	Produit.	Tonnage.	Produit.	Tonnage.	Produit.		totales.	par kilomètre.
		francs.	tonnes.	francs.	tonnes.	francs.	francs.	francs.	francs.
1875. .	90.182	120.644,40	49,8	677,80	1.681,2	27.384,00	4.518,90	153.225.10	16.714,85
1876. .	95.208	123.603,95	75,7	931,65	16.137,9	28.084,35	7.654,96	160.274,91	17.483,89
1877. .	75.197	95.878,10	59,5	787,60	487,5	4.160,55	21.046,85	121.873,10	13.294,76

La ligne ayant été ouverte le 12 mai 1875, le premier exercice correspond seulement à une période de 234 jours d'exploitation.

Les rapports aux actionnaires, dont nous avons voulu reproduire les chiffres sans modifications, comprennent dans le trafic des marchandises, en 1875 et 1876, comme tonnage et comme produit, les transports de matériaux et de ballast faits pour l'achèvement et l'entretien de la ligne. Ces

§ 2. — CHEMINS DE MONTAGNE A LOCOMOTIVES SPÉCIALES.

Système à roue dentée et crémaillère. — De tous les systèmes particuliers qui ont été employés à la construction des chemins de fer de montagne, le seul qui ait reçu un certain développement depuis quelques années (*) est celui

(*) Le système à rail central de M. Fell, n'a plus été mis en pratique, en Europe, depuis la destruction de la ligne provisoire du [M]ont Cenis.

[Q]uant au système, fort ingénieux en théorie, imaginé par M. Wetli [l]'affreuse catastrophe par laquelle ont été interrompues les expé[r]iences de Wädensweil, le 30 novembre 1876 (voir *Annales des ponts et chaussées*, 1877, 1[er] semestre, p. 258), a démontré qu'il devait recevoir de notables améliorations, au point de vue de la sécurité, avant de pouvoir prétendre à une application pratique. On se rappelle qu'il consistait dans l'emploi d'une locomotive portant un tambour muni de nervures hélicoïdales qui s'appuyaient sur des bouts de rails inclinés et disposés entre les deux files de rails de la voie en forme de chevrons (la pointe dirigée vers le sommet de la rampe). L'effort du piston s'exerçait simultanément sur les roues et sur le tambour, de sorte que la machine fonctionnait à la fois

hemin de fer de l'Uetliberg.

DÉPENSES D'EXPLOITATION.							RECETTES NETTES		RAPPORT
					DÉPENSES				
Administration générale.	Service de la voie.	Service de l'exploitation.	Service du matériel et de la traction.	Dépenses diverses, impôts, assurances, etc.	totales.	par kilomètre.	totales.	par kilomètre.	des dépenses aux recettes.
francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	p. 100.
12.920,03	10.021,33	6.460,50	37.840,64	619,50	67.862,00	7.402,85	85.363,10	9.312,00	48
15.032,51	13.774,22	5.170,30	48.710,19	2.727,60	85.414,82	9.317,63	74.860,09	8.166,25	53
9.038,35	15.082,85	4.494,35	31.793,65	4.525,55	64.924,75	7.082,44	56.948,35	6.212,32	46

transports se sont élevés en 1875 à 15.212^{t},5 et en 1876 à 15.577^{t},5, et ont donné lieu à des recettes de 16.516^{f},00 et 22.951^{f},25.

Dans la répartition des dépenses d'exploitation, le traitement des conducteurs de trains et garde-freins est compris dans le chiffre correspondant au service du matériel et de la traction.

que M. Riggenbach a appliqué pour la première fois en Europe au chemin de Vitznau au Rigi : c'est le système à roue dentée et crémaillère.

Bien que la plupart des lignes dont M. C. Maader annonçait la prochaine construction (*voir* notre précédente Note) soient restées à l'état de projet, faute de capitaux, le système à crémaillère n'en est pas moins appliqué aujourd'hui en Europe sur neuf lignes de chemins de fer où circulent trente-trois locomotives.

Ces lignes sont les suivantes :

Chemin des carrières d'Ostermundigen (Suisse, canton de Berne) ;
— de Vitznau au Rigi (Suisse, canton de Lucerne) ;
— du Kahlenberg (près de Vienne, Autriche) ;
— du Schwabenberg (près de Bude, Hongrie) ;
— d'Arth au Rigi (Suisse, canton de Schwytz) ;
— de Rorschach à Heiden (Suisse, canton de Saint-Gall) ;

par adhérence et par engrenage, car les nervures et les rails en chevrons constituaient véritablement un double engrenage hélicoïdal.

Chemin des usines royales de Wasseralfingen (royaume de Wurtemberg);
— des usines de M. C. Honegger, à Rüti (Suisse, canton de Zurich);
— des carrières de Laufen (Suisse, canton de Berne).

Dans notre précédente Note, nous avons dit quelques mots des cinq premières lignes, et notamment des deux chemins autrichiens du Kahlenberg et du Schwabenberg. Nous ne reviendrons pas sur ces derniers, ni sur le chemin d'Ostermundigen, raccordement industriel livré à l'exploitation à la fin de 1870, et reliant des carrières de pierres à la station du chemin de Berne à Thun par une ligne construite seulement en partie à crémaillère (*).

Quant au chemin de Vitznau au Rigi, la description en a été faite depuis longtemps; nous entrerons seulement dans quelques détails sur les dépenses de construction et les résultats d'exploitation de cette ligne depuis son ouverture.

Chemin de Vitznau au Rigi. — La concession faite par le canton de Lucerne à la compagnie du chemin de fer de Vitznau au Rigi ne comprenait que la portion, longue de 5 kilomètres, de la ligne aujourd'hui exploitée par cette compagnie, comprise entre les stations de Vitznau et de Staffel. Les 2 kilomètres restants, de Staffel au Kulm, se trouvaient sur le territoire de Schwytz et furent concédés par les autorités de ce canton à une autre société, la compagnie du chemin d'Arth au Rigi, qui se forma bientôt après celle de Vitznau.

Après entente entre les deux compagnies, la section de Staffel au Kulm a été construite aux frais de la compagnie d'Arth par la compagnie de Vitznau, qui l'exploite avec ses agents et son matériel, et l'entretient; les recettes brutes sont partagées entre les deux compagnies.

(*) Nous donnons, Pl. 17 le profil de cette ligne, ainsi que ceux de deux autres chemins à crémaillère qui ne figurent pas sur la planche jointe à notre première Note (1875, Pl. 7).

La ligne a été ouverte à l'exploitation jusqu'à Staffel le 23 mai 1871, et jusqu'au Kulm le 27 juin 1873.

Le compte de premier établissement, définitivement clos le 31 octobre 1876, accuse une dépense totale de 2.302.861f,55, dont voici le détail en divers chapitres :

Compte de premier établissement du chemin de fer de Vitznau au Rigi.

(Extrait du Rapport aux actionnaires sur l'exercice 1876.)

	francs.
1. Études préparatoires	30.000,00
2. Acquisitions de terrains	142.100,00
3. Terrassements	430.434.85
4. Maçonnerie	204.000,00
5. Pont sur le Schnurtobel	80.000,00
6. Tunnel	30.000,00
7. Superstructure de la voie	558.000,00

8. Bâtiments :

		francs.	francs.	
I. Station de Witznau.	Ancienne remise à machines	50.000,00		
	Halle à marchandises	3.000,00		
	Lieux d'aisances	1.000,00		
	Deux boutiques	1.500,00		
	Bâtiment de la station	30.000,00		
	Deux nouvelles remises	20.000,00		
		105.500,00	105.500,00	
II. Station de Freibergen			500,00	
III. Station de Romiti			1.500,00	
IV. Station de Kaltbad.	Bâtiment de la station	20.000,00		
	Remise	1.000,00		
		21.000,00	21.000,00	
V. Station de Staffelhöhe			10.000,00	
			138.500,00	138.500,00
			A reporter	1.613.034,85

francs.

Report. 1.613.034,85

9. Matériel d'exploitation :

I. Matériel roulant.	10 locomotives. . . .	350.000,00		
	12 voitures à voyageurs.	84.000,00		
	5 wagons à marchandises. . . .	12.500,00		
		446.500,00	446.500,00	
II. Mobilier et outillage.	Outillage d'entretien de la voie. . . .	593,10		
	Mobilier des stations et buffets	10.318,35		
	Outillage des ateliers de réparation. . .	7.475,80		
		18.387,25	18.387,25	
			464.887,25	464.887,25

10. Intérêts pendant la construction. 36.875,00

11. Domaine :

Grand restaurant de Vitznau et diverses propriétés foncières en dehors du chemin de fer proprement dit. . . . 188.064,45

Total. 2.302.861,55

Pour faire ressortir le prix de la construction proprement dite de la ligne, il y a lieu de mettre de côté les sommes relatives au domaine et au matériel d'exploitation.

On obtient ainsi une dépense totale de. . 1.649.909f,85

Soit par kilomètre, $\frac{1}{5}$. 329.981f,97

Mais il faut remarquer que, par suite de l'énorme mouvement des voyageurs, pour pouvoir tracer des trains en nombre suffisant et les faire correspondre avec les arrivées et les départs des bateaux à vapeur à Vitznau, on a dû poser une deuxième voie entre Freibergen et Kaltbad, sur une longueur de près de 2 kilomètres. Si l'on tient compte de cette dépense supplémentaire, on voit que le prix kilométrique de construction de la ligne à simple voie s'est élevé à 300.000 francs au maximum.

Le matériel roulant (y compris le mobilier et l'outillage) suffit à l'exploitation de la ligne complète, qui mesure

7 kilomètres de Vitznau au Kulm. Il représente donc une dépense par kilomètre de 66.412f,46.

Sur une ligne établie dans de telles conditions et exclusivement destinée aux excursions des touristes, l'exploitation est forcément limitée à une campagne de quelques mois pendant l'été. La durée en est d'environ cinq mois, du 15 mai au 15 octobre. Toutefois, pendant le reste de l'année, on fait selon les besoins, et autant que le temps le permet, des trains de marchandises, et, au moment de certaines fêtes, des trains d'excursion.

Malgré cette circonstance très-défavorable présentée par l'obligation de suspendre toute exploitation régulière pendant plus de la moitié de l'année, l'affluence des voyageurs sur la ligne de Vitznau a été telle jusqu'ici que, tandis que toutes les autres lignes à crémaillère ne donnent aucun bénéfice, le chemin de Vitznau au Rigi, dont les tarifs sont, il est vrai, très-élevés, a produit, au point de vue financier, de brillants résultats qui ont permis de distribuer à ses actionnaires, pour les sept premiers exercices, des dividendes dont la moyenne s'élève à 13,43 p. 100.

Les tableaux suivants font connaître l'importance du trafic et les résultats de l'exploitation pour les sept années écoulées depuis la construction de la ligne.

Mouvement des voyageurs, des bagages et des marchandises sur le chemin de fer de Vitznau au Rigi, depuis son ouverture.

ANNÉES.	VOYAGEURS.			BAGAGES.			MARCHANDISES.		
	Montée.	Descente.	Total.	Montée.	Descente.	Total.	Montée.	Descente.	Total.
				tonnes.	tonnes.	tonnes.	tonnes.	tonnes.	tonnes.
1871	33.104	27.158	60.262	170	102	272	1.562	38	1.600
1872	46.159	40.737	86.896	212	124	336	1.594	80	1.674
1873	49.761	46.301	96 062	210	154	364	(*) »	»	4.306
1874	54.083	50.311	104.394	190	149	339	9.243	227	9.470
1875	47.562	49.163	96.725	261	135	396	3.143	222	3.365
1876	37.693	39.874	77.567	244	123	367	747	85	832
1877	37.785	38.908	76.693	178	175	353	637	121	758

(*) La statistique du rapport aux actionnaires sur l'exercice 1873 ne permet pas de séparer le tonnage total des marchandises transportées en deux chiffres correspondant à la montée et à la descente.

Résultats de l'exploitation du chemin

ANNÉES.	LONGUEUR exploitée.	DURÉE de la période d'exploitation.	RECETTES.					
			Voyageurs.	Bagages.	Marchandises.	Diverses.	Totales.	Par kilomètre.
	kilom.	jours.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.
1871	5	146	222.478,90	7.168,40	24,081,25	4.493,85	258.222,40	51.644,48
1872	5	176	317.102,35	8.558,10	29.632,27	7.674.57	362.967,29	72.593,46
1873	7	148	380.622,40	9.885,20	72.318,95	21.428,89	484.255,44	69.179,35
1874	7	151	405.207,00	9.232,45	160,079.50	10.844,49	585.363,44	83.623,35
1875	7	148	366.547,35	10.085,55	63.129,17	15.931,59	455.693,66	65.099,09
1876	7	137	290.984,65	8.807,50	14.076,60	11.361,05	325.229,80	46.461,40
1877	7	137	288.655,30	8.789,35	12.504,35	17.068,11	327.017,11	46.716,73

(1) L'exploitation était affermée, en 1871, moyennant l'abandon de 30 p. 100 des recettes brutes. Il n'est donc pas possible, pour cet exercice, de donner le détail des dépenses. — (2) L'exploitation

Le tableau du trafic accuse des différences notables dans les nombres de voyageurs transportés. Ces variations sont la conséquence du temps qui règne pendant la saison des voyages. Les étés 1876 et 1877, qui ont été pluvieux et accompagnés de froids précoces, ont eu une très-fâcheuse influence à ce point de vue. Quant au mouvement des marchandises, il a crû rapidement jusqu'en 1874, pendant la période de construction des grands hôtels nécessités par l'affluence des touristes qu'amenait le chemin de fer sur le Rigi, et, d'autre part, des lignes d'Arth au Rigi, et de Kaltbad à Rigi-Scheideck. Depuis que ces travaux sont terminés, le chemin de fer n'a presque plus à transporter comme marchandises que les objets de consommation pour les hôtels.

Les recettes éprouvent naturellement les mêmes variations que le trafic, et, de 1874 à 1877, on les voit diminuer de près de moitié. Quant aux dépenses, elles suivent, relativement aux recettes, une marche ascendante ; ce fait

de fer de Vitznau au Rigi.

DÉPENSES.						RECETTES NETTES.		RAPPORT des dépenses aux recettes.	OBSERVATIONS.
Administration générale.	Entretien de la voie.	Exploitation.	Matériel et traction.	Totales.	Par kilomètre.	totales.	par kilomètre.		
francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	francs.	p. 100.	
»	»	»	»	81.189,65	16.237,93	177.032,75	35.406,55	31	(1)
19.536,30	9.916,12	8.411,13	44.970,51	82.834,36	16.566,87	280.132,93	56.026,59	23	(2)
18.464,18	15.665,12	15.579,82	119.022,26	168 731,38	24.104,48	315.524,06	45.074,87	35	(3)
28.429,12	36.522,81	28.275,36	144.744,13	237.971,42	33 995,92	347.392,02	49.627,43	41	
24.074,77	30.614,84	26.676,49	114.719,17	196.085,27	28.012,18	259.608,39	37 086,91	43	
20.371,32	25.818,51	18.568,66	96.380,03	161.138,52	23.019,79	164.091,28	23.441,61	49	
30.410,85	26.392,00	18.847,29	79.046,84	154.696,98	22.099,57	172.320,13	24.617,16	47	

a été suspendue, jusqu'au 30 juin, sur la section Kaltbad-Staffel, à cause des travaux de mines exécutés par la compagnie d'Arth. — (3) Ouverture de la section Staffel-Kulm le 27 juin.

tient à diverses causes parmi lesquelles il faut citer l'élévation des salaires du personnel, l'accroissement des frais d'entretien du matériel roulant résultant de l'augmentation successive du nombre des machines et des véhicules, et surtout la nécessité de procéder après un certain nombre d'années au remplacement de diverses pièces des machines et wagons, telles que roues dentées, bandages, etc.

Ajoutons d'ailleurs que, malgré la suppression presque complète des transports de marchandises, la diminution des transports de voyageurs causée par le mauvais temps et l'augmentation des frais d'exploitation, le rapport des dépenses aux recettes est toujours resté inférieur à 50 p. 100, et qu'après les mauvaises campagnes de 1876 et 1877 les actionnaires ont touché 9 et 8 p. 100 de dividende.

La construction du chemin de Vitznau a donc été une bonne opération au point de vue industriel et financier ; ses très-brillants débuts suscitèrent un engouement pour la crémaillère qui détermina bientôt de nouvelles applica-

tions de ce système à d'autres lignes situées dans des conditions analogues à celle de la ligne de Vitznau, c'est-à-dire destinées, comme celle-ci, aux voyages de plaisir pendant l'été seulement. Mais les résultats de leur exploitation ont été tout autres que ceux qu'on attendait, au point de vue financier du moins ; car si le fonctionnement de la machine sur la crémaillère a toujours présenté la plus grande régularité et une sécurité parfaite, il n'en est pas moins vrai que les capitaux engagés dans ces nouvelles entreprises n'y ont encore trouvé aucune rémunération. Les chemins de touristes dont nous parlons sont ceux du Kahlenberg et du Schwabenberg en Autriche-Hongrie, et la ligne d'Arth au Rigi en Suisse. D'après M. R. Abt, la ligne du Kahlenberg, entièrement construite à deux voies, sur 5.160 mètres de longueur, a coûté 4.500.000 francs, soit 870.000 francs par kilomètre; celle du Schwabenberg, de 3.030 mètres de longueur, a coûté 1.284.000 francs, soit 428.000 francs par kilomètre. Ces chiffres comprennent l'acquisition du matériel roulant.

Chemin d'Arth au Rigi. — La ligne d'Arth au Rigi se divise en deux sections : l'une de 1.400 mètres, entre Arth et Ober-Arth, construite sans crémaillère et exploitée avec une machine ordinaire, et le chemin de montagne proprement dit, d'Ober-Arth au Kulm. Ce dernier a un développement de $9^{k},8$ et présente des rampes dont l'inclinaison atteint 133 millimètres par mètre. A partir de Staffel, la compagnie d'Arth a posé une voie contiguë à celle qui est affermée à la compagnie de Vitznau, de sorte que les deux compagnies du Rigi peuvent régler, séparément et sans se gêner l'une l'autre, les heures d'arrivée et de départ de leurs trains.

D'après le rapport aux actionnaires sur l'exercice 1877, le capital employé à la construction de la ligne d'Arth au Kulm s'élevait, au 31 octobre 1877, au chiffre total de $6.503.169^{f},02$, savoir :

	francs.
Construction de la ligne Arth-Staffelhöhe-Kulm et acquisition du matériel roulant comprenant 1 locomotive ordinaire, 5 locomotives à roues dentées, 7 voitures à voyageurs et 5 wagons à marchandises..	6.253.340,47
Double voie de Staffelhöhe au Kulm.	205.578,55
Subvention au bateau à vapeur l'*Helvetia* sur le lac de Zug.	44.250,00
Total égal.	6.503.169,02
La dépense kilométrique correspondante est de.	580.640,00

Nous avons déjà dit que l'exploitation de cette ligne donnait des résultats fort peu satisfaisants. Voici en effet le résumé du compte d'exploitation relatif à la campagne 1877, qui a duré 146 jours, du 23 mai au 15 octobre, et pendant laquelle il a été transporté sur ce chemin 25.370 voyageurs.

I. *Recettes :*

	francs.	
1° Recettes de la ligne d'Arth-Kulm.	135.020,28	
2° Part dans les recettes de la ligne Staffelhöhe-Kulm (affermée à la compagnie de Vitznau).	43.554,45	
3° Recettes diverses.	1.896,50	
Total.	180.471,23	180.471.23

II. *Dépenses :*

1° Administration générale.	33.787,10	
2° Entretien et surveillance de la voie.	18.245,55	
3° Exploitation.	10.187,50	
4° Matériel et traction.	47.065,37	
Total.	109.285,32	109.285,32
Recettes nettes.		71.185,91

On voit que la recette nette représente seulement 1,09 p. 100 du capital de premier établissement.

Chemin de Rorschach à Heiden. — La ligne de Rorschach à Heiden, ouverte à l'exploitation le 6 septembre 1875,

relie le bourg important d'Heiden au réseau de l'Union Suisse, en passant par Schwendi et par Wienachten, où se trouvent de grandes carrières de pierre dont elle sert à exporter les produits. Pendant l'été, elle est fréquentée par les touristes; mais l'exploitation en est permanente, sans interruption pendant l'hiver, comme au Rigi.

Ce chemin, qui est entièrement construit à crémaillère, s'embranche toutefois, à 1 kilomètre environ au-dessus de Rorschach, sur la ligne en exploitation ordinaire qui longe le lac de Constance. Sur cette portion de voie, les trains de ou pour Heiden étaient d'abord remorqués par la machine de manœuvre de Rorschach; mais dans ces derniers temps on a transformé en roues motrices une paire de roues des machines à roue dentée, de manière à permettre à celles-ci d'assurer la traction des trains sur tout leur parcours, sur les voies ordinaires aussi bien que sur la ligne à crémaillère.

La ligne a une longueur de 5.500 mètres, et rachète une différence de niveau de 390 mètres, avec des rampes dont l'inclinaison est en moyenne de 71 millimètres et atteint 90 millimètres par mètre.

Le capital de premier établissement, comprenant l'achat de 3 locomotives, 9 voitures et 8 wagons, s'élève à environ 2.200.000 francs, soit à 400.000 francs par kilomètre.

L'exploitation de la ligne de Rorschach à Heiden n'a pas donné jusqu'ici de bénéfices.

Chemin minier des usines royales de Wasseralfingen (Wurtemberg). — Les importants établissements métallurgiques de Wasseralfingen tirent leur minerai d'une montagne voisine, le Braunenberg, d'où il était autrefois conduit à l'usine par des voitures. L'élévation constante des frais de transport d'une part, et d'autre part la nécessité d'emporter au loin les scories, que le haut prix des terrains cultivés de la vallée ne permettait plus d'entasser près de l'usine, déterminèrent le conseil royal des mines à

faire construire une voie ferrée destinée à la fois à amener le minerai aux hauts-fourneaux et à remonter les scories sur les terrains incultes de la montagne.

Les circonstances topographiques s'opposant à l'établissement d'une ligne de chemin de fer ordinaire, il fallait aborder les rampes caractérisant les chemins de montagne. Trois projets différents furent étudiés : un plan incliné à traction funiculaire ; une ligne à simple adhérence, mais comportant des rampes de 55^{mm},1 par mètre ; enfin une ligne tracée en rampes de 25 millimètres et 78 millimètres, avec crémaillère sur la rampe de 78 millimètres seulement.

Les devis ayant montré que cette dernière solution était la plus avantageuse, on la réalisa immédiatement. Le chemin fut achevé en trois mois et mis en service régulier le 28 octobre 1876.

Il a une longueur de 1.790 mètres, et comprend une section inférieure de 740 mètres, tracée avec des rampes de 25 millimètres au maximum, et des courbes dont le rayon minimum est de 120 mètres ; une section intermédiaire de 820 mètres, en rampe de 78 millimètres, seule munie d'une crémaillère ; une section supérieure de 250 mètres, qui est horizontale (*voir* Pl. 17, *fig.* 1, le profil de ce chemin). La ligne de Wasseralfingen est le seul chemin à crémaillère dont la voie n'ait pas la largeur normale ; l'écartement des rails est seulement de 1 mètre.

Le capital consacré à la construction de la ligne et à l'acquisition du matériel roulant (1 machine, 33.000 fr., et 16 wagons 10.600 fr.), s'élève à la somme de 218.000 fr., ce qui fait 121.000 francs par kilomètre.

En août 1877, la machine transportait par jour 70 tonnes de minerai et 62 tonnes de scories. Si on ajoute à l'intérêt et à l'amortissement du capital de premier établissement calculés à 10 p. 100 le salaire d'un mécanicien et d'un chauffeur, 3.375 francs, et enfin une somme de 13 francs

par jour pour le combustible et le chauffage (chiffre admis par M. R. Abt dans son *Étude sur les chemins à crémaillère*, publiée par l'*Organ*), on voit que la dépense journalière, calculée à raison de 300 jours de travail par an, était de 97 francs, et le prix de transport d'une tonne sur les 1^{k},8 que mesure la ligne, de 0^{f},73. Ce prix descendrait à 0^{f},40 avec un trafic correspondant à la marche normale de l'usine, qui aurait dans ce cas à expédier tous les jours 170 tonnes de scories et à recevoir 117 tonnes de minerai.

Embranchement particulier de M. G. Honegger *à Rüti.*— Le propriétaire d'un établissement industriel considérable à Rüti, dans le canton de Zurich, M. G. Honegger, a utilisé la crémaillère pour raccorder ses usines à la station du chemin de fer, située à une différence de niveau de 12 mètres en contre-haut.

Cet embranchement (*voir* le profil en long, Pl. 17, *fig.* 2) est ouvert depuis le mois de juin 1877; il a une longueur totale de 570 mètres; mais 140 mètres seulement, en rampe de 102 millimètres, sont exploités par crémaillère. Le rayon des courbes descend à 105 mètres. La construction, y compris l'achat d'une machine et de 5 wagons, et l'installation d'une plaque tournante et d'une remise à machine, a coûté environ 100.000 francs. On évalue le tonnage à transporter annuellement à 30.000 tonnes, et le prix de revient de transport d'une tonne à 0^{f},20.

Raccordement des carrières de Laufen.— Enfin tout dernièrement, une application semblable de la crémaillère a été faite sur l'embranchement qui relie les grandes carrières de pierre de Laufen (canton de Berne) avec la station du chemin de fer du Jura Bernois.

Cet embranchement, ouvert à l'exploitation le 15 avril dernier, mesure environ 500 mètres de longueur et comprend une section de 50 mètres en rampe de 60 millimètres qui est munie de la crémaillère.

Primitivement, la traction s'effectuait sans locomotive, à l'aide d'un treuil, avec lequel quatre hommes pouvaient remorquer un poids de 15 tonnes sur la rampe de 60 millimètres; mais on vient de mettre en service, à la place du treuil, une toute petite machine locomotive du poids de 6 tonnes.

On voit, d'après ce qui précède, que parmi les neuf lignes sur lesquelles la crémaillère est actuellement employée, quatre sont exploitées seulement pendant l'été et à peu près exclusivement utilisées par les promeneurs et les touristes: ce sont les deux chemins du Rigi et les deux lignes autrichiennes. L'exploitation des cinq autres est permanente; mais la ligne de Rorschach à Heiden est la seule qui comporte un service commercial de voyageurs et de marchandises; les chemins d'Ostermundigen, de Wasseralfingen, de Rüti et de Laufen, sont en effet des chemins purement industriels, exclusivement destinés aux transports de marchandises et fermés au public.

Lignes à crémaillère projetées. — Il existe actuellement deux projets de chemins à crémaillère dont l'exécution fournirait à ce système des applications d'une importance toute nouvelle. Nous voulons parler des lignes de l'Höllenthal (Fribourg à Neustadt, grand-duché de Bade) et du Saint-Gothard.

Ligne de Fribourg à Neustadt. — La ligne de Fribourg à Neustadt est destinée à compléter le chemin d'Offenbourg à Donaueschingen, et à relier ainsi, à travers les montagnes de la Forêt-Noire, la vallée du Rhin à celle du Danube.

Les difficultés considérables que présente le tracé d'une ligne de chemin de fer dans cette région ont fait penser à la crémaillère. Après plusieurs projets, dans lesquels on avait cherché à réduire au strict minimum la longueur de la crémaillère, ou même à l'employer seulement pour une ligne provisoire, en attendant que l'accroissement du trafic nécessitât l'achèvement du chemin définitif à adhérence,

une nouvelle étude vient d'être faite avec le plus grand soin par M. l'ingénieur en chef Muller, chargé par les communes de Fribourg et de Neustadt de déterminer les conditions d'emploi de la crémaillère les plus économiques et les plus avantageuses.

Le rapport de cet ingénieur conclut à l'adoption d'un tracé mesurant $34^k,7$ de longueur, dont $11^k,9$ seraient construits à crémaillère entre Himmelreich et Hinterzarten. Le maximum d'inclinaison est fixé à 20 millimètres par mètre pour la voie à adhérence, et à 52 millimètres pour la voie à crémaillère. Une machine à roue dentée, mixte, pesant 20 tonnes en service et semblable à celle que M. Riggenbach a exposée au Champ de Mars (galerie des machines, section suisse), pourrait remorquer par adhérence, sur la rampe de 20 millimètres, 80 tonnes à la vitesse de 20 ou 25 kilomètres à l'heure, et par engrenage, sur la rampe de $52^{mm},3$, la même charge à la vitesse de 10 kilomètres à l'heure.

Le devis s'élève à une somme totale de 10.760.000 fr., y compris les intérêts pendant la construction et l'achat du matériel roulant, moins les wagons à marchandises.

On évalue le produit de la ligne à 575.000 francs et les frais d'exploitation à 362.000; la recette nette serait donc de 213.000 francs, soit environ 2 p. 100 du capital employé.

Ligne du Saint-Gothard. — Depuis plusieurs années déjà, MM. Riggenbach et Zschokke ont fait pour la ligne du Saint-Gothard un projet dans lequel ils proposaient d'appliquer la crémaillère aux lignes aboutissant sur l'un et l'autre versant aux têtes du grand tunnel, dans le but de réduire à la fois les difficultés de tracé et les frais énormes de construction de lignes à simple adhérence sur ces deux points. L'idée de l'emploi de la crémaillère sur les rampes d'accès du grand souterrain paraît avoir aujourd'hui rallié les suffrages de quelques ingénieurs, parmi lesquels M. Rig-

genbach cite (*) M. Hellwag, ingénieur chargé des études de la ligne du Saint-Gothard, et M. Thommen, ingénieur autrichien qui a construit la ligne du Brenner.

Voici, d'après les devis de M. Hellwag cités par M. Riggenbach, la comparaison des frais de construction des deux lignes d'accès dans les deux hypothèses du rejet ou de l'adoption de la voie à crémaillère.

1° *Frais de construction avec voie ordinaire et rampe de 25 à 27 millimètres par mètre.*

		francs.	
Versant nord.	Gurtenellen-Wasen. . . .	10.578.000	
	Wasen-Gœschenen. . . .	11.058.000	
Versant sud.	Dazio-Polmengo.	9.459.000	
	Lavorgo-Giornico.	10.876.000	francs.
	Total.	41.971.000	41.971.000

Frais de construction avec rampes de 50 millimètres et crémaillère.

Versant nord.	Gurtenellen-Wasen. . . .	3.047.800	
	Wasen-Gœschenen. . . .	3.015.000	
Versant sud.	Dazio-Polmengo.	2.372.800	
	Lavorgo-Giornico.	3.842.000	
	Total.	12.277.600	12.277.600

Différence en faveur de la seconde hypothèse, environ.	29.000.000
A déduire : prix de la crémaillère avec tous ses accessoires, sur 14^k,5, à raison de 70.000 fr. par kilomètre, environ.	1.000.000
Économie présentée par le projet avec crémaillère.	28.000.000

Il faut ajouter que la longueur de la ligne étant notable-

(*) Dans une Note adressée le 26 mai 1877 à la Conférence internationale du Saint-Gothard, et à laquelle nous empruntons ces détails.

ment réduite dans la seconde hypothèse, les travaux seraient plus rapidement achevés, et, de plus, que la durée des rails se trouverait augmentée dans une large mesure par la suppression du patinage des roues motrices des machines et, à la descente, du frottement des roues enrayées par les freins.

La locomotive aurait deux essieux moteurs, à écartement de 3m,20, plus un avant-train et un arrière-train mobiles; la charge serait de 12 tonnes sur chaque essieu moteur, de 4 tonnes sur l'essieu d'avant et de 6 tonnes sur l'essieu d'arrière, ce qui porte à 34 tonnes le poids total de la machine. Une telle machine serait capable de remorquer, savoir :

	tonnes.		kilom.
Sur une rampe de 20 millim. par adhérence	100	à la vitesse	de 25 à 30, ou
	120	—	de 15 à 20
Sur une rampe de 50 millim. par engrenage	100	—	de 10 à 15, ou
	120	—	de 8 à 10

Sous le grand tunnel, où la rampe ne dépasse pas 6 millimètres, la vitesse serait de 30 à 35 kilomètres.

Malgré la réduction de vitesse imposée par la crémaillère, comme 14k,5 de crémaillère remplacent 30 kilomètres de voie ordinaire en rampe de 25 à 27 millimètres, la durée totale du trajet, soit pour les trains de voyageurs, soit pour les trains de marchandises, ne serait pas augmentée.

Huit trains par jour dans chaque sens suffiraient pour un trafic annuel total estimé à 260.000 voyageurs et 500.000 tonnes de marchandises. Il est vrai que M. Riggenbach suppose, dans son calcul du nombre des trains, que les trains de marchandises seraient remorqués par deux machines, l'une en tête, l'autre en queue; or il semble difficile d'admettre que l'attelage de deux machines au même train puisse se faire sur la crémaillère sans entraîner de graves inconvénients et même des causes sérieuses d'accident. Il est donc prudent de compter sur un nombre

de trains supérieur à celui qu'indique M. Riggenbach, en admettant toutefois comme exactes les évaluations du trafic qui lui ont servi de base.

Quant aux frais de traction correspondant au transport d'une tonne d'un bout à l'autre de la ligne, ils seraient les mêmes avec la crémaillère que sur la ligne à adhérence, en admettant que les machines à roue dentée dépenseront $1^f,50$ par kilomètre, comme les machines du Brenner et du Semmering. Les dépenses particulières au mode d'exploitation par crémaillère se réduisent au remplacement des roues dentées, qui, d'après M. Riggenbach, devrait avoir lieu après un parcours de 30 à 40.000 kilomètres. Ce chiffre nous semble un peu élevé, en comparaison des résultats fournis par l'expérience sur l'usure des roues dentées (*voir* plus loin).

Enfin, si l'on considère que le système d'exploitation par crémaillère et roue dentée, appliqué sur neuf lignes dont quelques-unes sont ouvertes depuis plusieurs années, n'a jamais donné lieu au moindre accident, il faut bien reconnaître que la sécurité de la circulation est au moins aussi grande sur une ligne à crémaillère en rampe de 50 millimètres que sur une ligne à adhérence en rampe de 25 à 27 millimètres.

Nous nous garderions d'émettre un avis sur une question aussi grave que le choix du projet à adopter pour la ligne du Saint-Gothard. Nous nous bornerons à dire qu'étant donnée la nécessité d'adopter, à cause de la configuration du terrain, soit pour le tracé, soit pour le mode d'exploitation, des solutions tout à fait particulières, l'idée d'employer la crémaillère, quelque étrange qu'elle puisse paraître à première vue à propos d'une ligne de transit international, nous paraît ne pas devoir être repoussée sans discussion, et en raison de l'économie très-considérable que ce projet permettrait de réaliser sur les frais

de construction, il nous semble mériter d'être pris en considération.

Il nous reste maintenant à donner quelques détails sur les divers types de voie à crémaillère et de machines à roue dentée.

Divers types de voie à crémaillère. — Les types de voie à crémaillère adoptés pour la construction des lignes aujourd'hui existantes présentent entre eux certaines différences.

La raideur de la rampe adoptée pour le chemin de Vitznau au Rigi avait exigé les plus grandes précautions pour prévenir le glissement longitudinal de la voie ; aussi, outre deux cours de longuerines extérieures aux rails et boulonnées avec les traverses, on avait soutenu deux traverses consécutives, tous les 75 ou 100 mètres, par des blocs de pierre de taille reposant sur une fondation en maçonnerie (*voir* Pl., 17, *fig.* 6) (*).

Mais sur les lignes construites avec des rampes dont l'inclinaison ne dépasse pas 50 à 80 millimètres, on peut parfaitement supprimer fondations et longuerines, pourvu que les rails ne soient pas d'un trop petit échantillon, les rails et la crémaillère suffisant très-bien à assurer la fixité de la voie ; les chemins de Wasseralfingen, de Rüti et de Laufen sont ainsi construits sans longuerines.

La crémaillère des six premières lignes a un pas de 100 millimètres et peut résister à un effort de la roue dentée mesuré par une pression de 6.000 kilog. sur une dent. A Wasseralfingen, à Rüti et à Laufen, le pas n'est que de 80 millimètres et la pression maximum de 3.000 kilog.

La crémaillère des deux chemins du Rigi et des deux lignes autrichiennes repose directement sur les traverses.

(*) Les *fig.* 4 à 6 de la Pl. 17 ainsi que sur les *fig.* 3 à 11 de la Pl. 16 sont reproduites d'après les planches du *Handbuch für Spezielle Eisenbahn Technik* de M. *Heuzinger von Waldegg.*

Sur celle de Rorschach à Heiden, elle est relevée et soutenue par les longuerines, qui, dans ce but, sont placées intérieurement aux rails (*voir* Pl. 17, *fig.* 4). L'avantage d'une telle disposition est d'exhausser la roue dentée dans la machine, qui peut ainsi plus facilement circuler sur les voies des chemins de fer ordinaires. De plus, dans cette position élevée, la crémaillère est moins exposée à être embarrassée par la neige, ce qui est important pour une ligne à exploitation continue; afin d'éviter tout inconvénient de ce côté, on a creusé le ballast en cuvette, au-dessous de la crémaillère, en ménageant entre sa face inférieure et le sol une hauteur de $0^m,30$.

A Wasseralfingen et à Rüti, où il n'y a pas de longuerines, ce sont des dés en bois qui soutiennent la crémaillère au-dessus de chaque traverse; aux points correspondant aux joints de la crémaillère, les dés sont remplacés par des supports en fonte (*voir* Pl. 17, *fig.* 5).

Le tableau suivant contient, pour les neuf chemins à crémaillère, les principaux renseignements concernant le tracé de la ligne et la structure de la voie :

Données principales sur le tracé et la voie des chemins à *crémaillère*.

DÉSIGNATION des lignes.	LARGEUR de la voie.	LONGUEUR. de la ligne.	LONGUEUR. de la crémaillère.	RAMPE maximum.	HAUTEUR totale rachetée.	RAYON normal des courbes.	CRÉMAILLÈRE. Pas.	CRÉMAILLÈRE. Poids par mètre courant.	CRÉMAILLÈRE. Nature de ses supports.	CRÉMAILLÈRE. Mode d'attache de ses segments.	POIDS des rails par mètre courant.	OBSERVATIONS.
	mètres.	kilom.	kilom.	millim.	mètres.	mètres.	millim.	kilog.			kilom.	
Ostermundigen. .	1,435	1,500	0,560	100,0	33	»	100	58,00	Un cours de longuerines	Éclisses latérales maintenues par deux dents	32,0	(1)
Vitznau au Rigi. .	1,435	7,100	7,100	250,0	1.311	180	100	55,55	Traverses	Semelles sous les fers en ⊏	16,6	(2)
Kahlenberg. . . .	1,435	5,156	5,156	100,0	285	180	100	55,55	Id.	Id.	20,0	(3)
Schwabenberg. .	1,435	3,000	3,000	102,5	260	180	100	55,55	Id.	Id.	20,0	(4)
Arth au Rigi. . .	1,435	11,200	9,800	212,57	1.332	180	100	55,55	Id.	Id.	20,0	(5)
Rorschach à Heiden.	1,435	5,500	5,500	90,0	390	240	100	53,05	Double cours de longuerines	Id.	20,0	(6)
Wasseralfingen. .	1,000	1,790	0,820	78,5	75	400	80	47,00	Supports en fonte et dés en bois	Supports en fonte	32,0	(7)
Rüti.	1.435	0,570	0,140	102,0	10	105	80	45,5	Id.	Id.	20,0	(8)
Laufen.	1,435	0,500	0,050	60,0	30	»	80	»	»	»	»	(9)

(1) Raccordement industriel.

(2) Chemin de touristes à exploitation limitée à l'été. — Sur les 7 kilom. exploités, 1k,680 appartiennent à la compagnie d'Arth. — Double voie sur 1k,900 de longueur.

(3) Chemin à exploitation limitée à l'été. — Entièrement à double voie.

(4) Chemin à exploitation limitée à l'été. — Double voie sur 170 mètres.

(5) Chemin de touristes à exploitation limitée à l'été. — Les 1k,400 sans crémaillère sont exploités à l'aide d'une machine spéciale. — Double voie sur 350 mètres.

(6) Chemin à exploitation permanente. — Double voie sur 175 mèt. — Rayon minimum des courbes : en pleine voie, 180 mètres ; sur les changements de voie, 120 mètres.

(7) Chemin industriel.

(8) Raccordement industriel.

(9) Raccordement industriel.

On connaît la disposition ingénieuse à l'aide de laquelle on assure l'engrenage avec la crémaillère de la roue dentée d'une machine qui passe d'une section de voie ordinaire sur une section munie de la crémaillère. Nous rappellerons qu'elle consiste à adapter, au commencement de la crémaillère proprement dite, un segment de crémaillère dont les dents ont un écartement de 2 millimètres plus grand que celui des dents de la roue, et qui est posé sur des ressorts lui permettant de s'abaisser lorsque ses dents sont rencontrées par celles de la roue motrice de la machine. L'engrenage ne peut pas manquer de se produire, en raison de cette différence entre les intervalles des dents, différence qui produit, pendant que la machine achève de franchir le segment mobile, un léger glissement des roues motrices roulant sur rails.

Pour les changements de voies sur les lignes à crémaillère, on avait employé jusqu'ici un chariot portant une longueur de voie suffisante pour recevoir un train, mobile sur des galets roulant sur des rails perpendiculaires à ceux de la ligne, et permettant d'amener le train en face de la voie déviée sur laquelle il devait continuer sa route. M. Riggenbach vient d'imaginer un système de changement de voies pour les lignes à crémaillère tout à fait semblable aux appareils en usage sur les lignes ordinaires et à l'aide duquel on peut faire passer un train d'une voie sur une autre par une simple manœuvre d'aiguille.

Pour en finir avec la crémaillère, nous ajouterons que l'usure de ses dents est presque insensible sur la ligne de Vitznau, où ont déjà circulé plus de 21.000 trains; la diminution d'épaisseur des dents n'a pu encore être mesurée, même sur les rampes de 250 millimètres. On estime qu'il faut le passage de 1 million de trains pour produire une usure de 1 millimètre. Les frais d'entretien de la crémaillère sont donc à peu près négligeables.

Divers types de machines à roue dentée. — Dans les ma-

chines à roue dentée, le piston commande un arbre intermédiaire, qui communique son mouvement à l'arbre sur lequel est calée la roue dentée motrice, soit au moyen de deux pignons et de deux roues dentées spéciales (*Ostermundigen*, *Vitznau*, *Kahlenberg*, *Schwabenberg*, *Arth*, *Rorschach*), soit à l'aide d'un pignon unique engrenant avec la roue dentée motrice elle-même (*Wasseralfingen*, *Rüti*). L'arbre intermédiaire porte, de plus, des poulies de frein à gorge cannelée, d'un effet très-énergique et permettant l'arrêt immédiat du train dans toute position.

Toutes ces machines sont à deux essieux. Celles qui ne doivent circuler que sur des voies à crémaillère ont leur quatre roues libres. Dans les autres, un ou deux essieux sont rendus moteurs par une liaison dont le mode varie suivant les machines, soit avec l'arbre intermédiaire, soit avec l'arbre de la roue dentée motrice.

Sur la première machine d'Ostermundigen, l'essieu d'arrière consiste en un manchon en fer, sur lequel sont calées les roues, et qui renferme un arbre en acier terminé à ses deux extrémités par des manivelles reliées par des bielles à l'arbre intermédiaire. Quand la machine marche sur la voie à crémaillère, le manchon portant les roues reste indépendant ; ce manchon est au contraire rendu solidaire de l'arbre intérieur à l'aide d'un embrayage, lorsque la machine doit circuler sur les voies ordinaires. Les roues d'arrière deviennent ainsi motrices, et, comme elles sont accouplées, non avec l'arbre de la roue dentée motrice, mais avec l'arbre intermédiaire, la vitesse de translation de la machine est plus grande que pendant la circulation sur la crémaillère, ce qui est avantageux.

Cette disposition présentait cependant l'inconvénient d'exiger l'arrêt complet de la machine au moment du passage de la voie ordinaire sur la crémaillère ou inversement, pour embrayer le manchon avec l'arbre central et faire engrener la roue dentée motrice avec la crémaillère, ou

pour débrayer. Dans le but d'éviter cet arrêt, la seconde machine d'Ostermundigen et celles des chemins de Wasseralfingen et de Rüti ont été construites différemment : on a supprimé l'embrayage, et l'arbre de la roue dentée motrice est mis en relation d'une manière permanente, par des bielles, avec les deux essieux porteurs (*Ostermundigen*, *Wasseralfingen*), ou avec l'un de ces essieux (*Rüti*). Il n'y a donc plus de manœuvre à faire pour passer d'une voie sur l'autre, et la machine effectue ce passage avec un simple ralentissement.

Mais ici nous rencontrons deux nouveaux inconvénients : d'une part, la vitesse de translation est aussi faible sur les voies ordinaires que sur la crémaillère ; d'autre part, pendant la circulation sur la crémaillère, la moindre différence entre le diamètre de roulement de la roue dentée motrice et le diamètre des roues porteuses, qui ne cessent pas d'être roues motrices par adhérence, produit une perte de travail peu considérable, il est vrai, mais sensible, et augmente l'usure des rails et des bandages. Dans la pratique, on donne aux bandages neufs un diamètre supérieur de 6 millimètres à celui de la roue dentée ; le travail résistant dû au glissement diminue à mesure que les bandages s'usent, devient nul quand leur diamètre est égal à celui de la circonférence de roulement de la roue dentée, et va ensuite en augmentant jusqu'à ce qu'on remplace les bandages.

Pour supprimer cette perte de travail, M. Riggenbach a imaginé d'ajouter à chaque essieu, entre les deux roues calées sur leurs portées et reliées par des bielles à l'arbre de la roue dentée motrice, deux roues folles, qui sont destinées à supporter la machine sur les sections munies de la crémaillère. Il y a dans ce but deux files de rails spéciales, posées à un niveau un peu supérieur à celui des autres rails, de telle sorte que les roues motrices tournent en l'air et qu'on n'a plus à redouter aucune perte de travail. Cette disposition, qui n'est évidemment applicable que sur les

lignes comportant seulement une très-faible longueur de crémaillère, a été réalisée dans la machine qui a récemment remplacé le treuil à bras sur le raccordement des carrières de Laufen, machine qui présente d'ailleurs d'autres particularités. En effet, l'arbre intermédiaire a été supprimé ainsi que l'arbre spécial de la roue dentée, et c'est sur l'un des essieux que se trouve calée cette roue dentée motrice ; des bielles réunissent les deux paires de roues l'une avec l'autre, et l'une d'elles avec les tiges des pistons. De plus, la chaudière est verticale comme sur la ligne de Vitznau. La machine dont nous parlons pèse seulement, malgré ses doubles roues, 6 tonnes en état de service.

Une meilleure solution est celle que nous fournit la machine figurant à l'Exposition universelle du Champ de Mars. Nous retrouvons ici l'indépendance des deux mouvements par engrenage et par adhérence, comme sur la première machine d'Ostermundigen ; seulement l'embrayage est différent. Le pignon porté par l'arbre intermédiaire et communiquant le mouvement à la roue dentée motrice peut être déplacé le long de cet arbre, et être rendu libre en quittant la portion de l'arbre garnie de nervures formant clavettes qui le calent et le font participer à son mouvement de rotation ; mais en même temps, un second pignon, porté par le même arbre et précédemment libre, est amené sur les nervures et devient à son tour moteur. Ce second pignon engrène avec une roue dentée portée sur un arbre spécial dont les extrémités recourbées en manivelles transmettent le mouvement, à l'aide de bielles, aux roues roulant sur rails. Ainsi l'effort du piston n'est transmis qu'alternativement à la roue dentée et aux roues d'adhérence. Le déplacement longitudinal des deux pignons sur leur arbre n'est pas assez grand pour leur faire quitter les dents des roues avec lesquelles ils sont en relation et avec lesquelles, par suite, l'un et l'autre ne cessent jamais d'engrener. L'arrêt de la machine n'est pas nécessaire pour changer

son mode d'action ; il suffit de ralentir sa marche à l'entrée et à la sortie des sections à crémaillère.

La Pl. 16 représente en croquis les machines dont nous venons de signaler les différences au point de vue du mécanisme ; le tableau suivant fait connaître leurs principales dimensions.

Principales dimensions des locomotives *à roue dentée* actuellement en service.

DÉSIGNATION des lignes.	Nombre de machines.	MODE de traction.	ROUE dentée motrice. Diamètre.	ROUE dentée motrice. Nombre de dents.	RAPPORT des vitesses angulaires de la roue dentée motrice et de l'arbre intermédiaire.	ROUES motrices par adhérence. Nombre.	ROUES motrices par adhérence. Diamètre.	Écartement des essieux.	CYLINDRE. Diamètre.	CYLINDRE. Course.	SURFACE de chauffe directe.	SURFACE de chauffe indirecte.	SURFACE de chauffe totale.	Surface de grille.	Pression de la vapeur.	Longueur entre les tampons.	POIDS à vide.	POIDS en service.	Pression exercée par les dents de la roue motrice.	Vitesse à l'heure.	OBSERVATIONS.
			mèt.				mèt.	mèt.	mèt.	mèt	m²	m²	m²	m²	atm.	mèt.	ton.	ton.	kilog.	kil.	
Ostermundigen.	1	Engrenage et adhérence.	0,796	25	$\frac{1}{3,0}$	2	1,152	2,985	0,27	0,40	3,37	47,43	50,80	0,73	9	7,10	18,0	21,0	5.400	6	(1)
	1	Engrenage et adhérence.	0,796	25	$\frac{1}{3,0}$	4	0,800	2,200	0,30	0,50	6,02	46,00	52,02	1,04	10	6,70	15,7	19,0	6.000	6	(2)
Vitznau au Rigi.	10	Engrenage.	0,636	20	$\frac{1}{3,0}$	»	»	3,000	0,27	0,40	2,88	55,50	58,38	0,82	10	6,20	10,0	12,5	6.000	5	(3)
Kahlenberg. . .	6	Engrenage.	1,050	33	$\frac{1}{2,4}$	»	»	3,100	0,33	0,45	5,84	44,50	50,34	1,04	9	6,66	13,5	16,0	5.200	10	
Schwabenberg .	4	Engrenage.	1,050	33	$\frac{1}{2,4}$	»	»	3,100	0,33	0,45	5,84	44,50	50,34	1,04	9	6,66	13,5	16,0	5.200	10	
Arth au Rigi . .	5	Engrenage.	1.050	33	$\frac{1}{2,4}$	»	»	3,000	0,30	0,50	5,84	44,50	50,34	1,04	10	6,40	13,5	16,5	6.000	8	
Rorschach à Heiden. . . .	3	Engrenage et adhérence.	1,050	33	$\frac{1}{2,4}$	2	0,820	3,000	0,30	0,50	5,84	44,50	50,34	1,04	10	6,90	12,5	16,0	6.000	10	(4)
Wasseralfingen.	1	Engrenage et adhérence.	0,764	30	$\frac{1}{2,1}$	4	0,770	1,850	0,24	0,45	3,90	21,10	25,00	0,62	9	5,23	9,1	11,0	3.000	8	(5)
Rüti.	1	Engrenage et adhérence.	0,764	30	$\frac{1}{2,1}$	4	0,770	1,850	0,24	0,45	3,90	21,10	25,00	0,62	9	5,84	9,0	11,0	3.000	8	(6)
Laufen.	1	Engrenage et adhérence.	0,433	17	»	4	0,490	1,500	0,20	0,32	1,50	11 00	12,50	0,36	8	2,76	5,2	6.2	1.500	10	(7)

(1) Les roues motrices par adhérence peuvent être rendues libres au moyen d'un embrayage.

(2) Les deux modes de traction ne peuvent pas être appliqués isolément.

(3) Chaudière droite.

(4) Machines construites pour fonctionner seulement par engrenage, puis modifiées par l'adjonction d'un embrayage permettant de rendre moteur l'essieu d'arrière.

(5) Les deux modes de traction ne peuvent pas être appliqués isolément.

(6) Idem. Idem.

(7) Chaudière droite. Pas d'arbre intermédiaire. La roue dentée motrice est calée sur l'un des essieux. Outre les roues d'adhérence, les essieux portent intérieurement des roues folles de $0^m,43$ de diamètre. La longueur de la machine a été mesurée sans compter les tampons.

Sauf la première machine d'Ostermundigen, toutes les locomotives à roue dentée utilisent, comme modérateur de vitesse à la descente sur la crémaillère, un frein à air consistant en ceci : le régulateur restant complètement fermé, le levier de changement de marche est placé dans la position opposée à celle qui correspond au sens de la marche du train, de manière que le piston aspire l'air par l'échappement et le refoule dans la conduite d'admission de vapeur; en ouvrant plus ou moins un robinet qui met cette conduite en communication avec l'atmosphère, le mécanicien règle à volonté la vitesse d'écoulement de l'air comprimé, et, par suite, le travail résistant dû à la compression et la vitesse du train. L'air aspiré dans les cylindres est pris directement dans l'atmosphère à l'aide d'un robinet spécial placé sur l'échappement, et qui, en s'ouvrant, intercepte en même temps la communication avec la boîte à fumée, pour éviter l'arrivée des escarbilles dans le cylindre.

Enfin on prévient l'échauffement des cylindres et des pistons par l'injection d'un filet d'eau. Ce qui a fait préférer ce frein à la contre-vapeur, c'est qu'il ne dépense absolument rien, tandis que dans la pratique l'emploi de la contre-vapeur entraîne toujours une certaine perte de vapeur, c'est-à-dire de combustible.

Les seuls frais particuliers aux machines à crémaillère consistent dans le graissage de la roue dentée et l'usure de ses dents. Pour le graissage de la roue dentée, on consomme environ, par kilomètre parcouru, 85 grammes d'huile sur la ligne de Vitznau au Rigi, 107 grammes sur la ligne d'Arth au Rigi, et 119^{gr},4 sur la ligne de Rorschach à Heiden. Quant à l'usure de la roue dentée, elle a donné lieu, sur l'ensemble des machines de quatre lignes à crémaillère, à des observations dont voici les résultats :

NOM du chemin.	NOMBRE de dents de la roue motrice.	USURE MOYENNE DES DENTS. par kilomètre parcouru.	USURE MOYENNE DES DENTS. pour chaque passage sur la crémaillère.	PARCOURS correspondant à l'usure maximum de 8 millimètres.
		millim.	millim.	kilom.
Ostermundigen. .	25	0,00047	0,000001175	17.021
Vitznau.	20	0,000444	0,000000888	18.018
Arth.	33	0,000312	0,000000937	28.175
Rorschach.	33	0,000290	0,000000870	30.345

Observations. — L'usure est plus rapide sur la ligne d'Ostermundigen que sur les autres, à cause de la forme des dents de la crémaillère et de celle des dents de la roue motrice, qui ne sont pas tracées à développantes comme sur les autres lignes.

Enfin, pour donner une idée de la puissance des machines remorquant un train par engrenage sur une voie à crémaillère, nous avons indiqué dans le tableau ci-dessous les charges et les vitesses de marche de quelques-unes des locomotives à roue dentée.

DÉSIGNATION des machines.	POIDS en service.	MODE de traction.	INCLINAISON de la voie.	VITESSE de marche.	POIDS remorqué.
	tonnes.		millim.	kilom.	tonnes.
Ostermundigen (2e type). .	19,0	Adhérence.	25	15	75
		Engrenage.	100	10	36
Vitznau au Rigi.	12,5	Engrenage.	250	5	8
Arth au Rigi.	16,5	Id.	212	8	11
Rorschach à Heiden. . . .	16,0	Id.	90	10	44
Wasseralfingen.	11,0	Adhérence.	25	15	35
		Engrenage.	80	10	35
Machine exposée au Champ de Mars.	18,0	Adhérence.	0	20 à 25	300
		Id.	10		150
		Id.	20		90
		Id.	25		70
		Engrenage.	40	10 à 12	110
		Id.	50		90
		Id.	60		75
		Id.	70		60
		Id.	80		50
Machine en projet pour la ligne du Saint-Gothard. .	34,0	Adhérence.	20	25 à 30	100
		Id.	20	15 à 20	120
		Engrenage.	50	10 à 15	100
		Id.	50	8 à 10	120
Machine projetée, pour des lignes construites sur l'accotement des routes vicinales	7,0	Adhérence.	10	25	50
		Id.	40	15	15
		Engrenage.	70	10	15

Tarif des chemins à crémaillère exploités commercialement. — Nous avons déjà dit que les tarifs du chemin de fer du Rigi sont très-élevés. En effet, les deux compagnies du Rigi font payer aux voyageurs, presque sans réduction, les taxes maxima fixées par leurs cahiers de charges, soit 1 franc par kilomètre à la montée et $0^f,50$ à la descente.

Sur le chemin de Rorschach à Heiden, les prix en vigueur correspondent à une taxe kilométrique qui est environ, à la montée, de $0^f,545$ pour la 1re classe et $0^f,273$ pour la 2e classe, et à la descente, de $0^f,364$ pour la 1re classe et $0^f,182$ pour la 2e classe.

Enfin les deux lignes autrichiennes ont des tarifs beaucoup moins élevés. Sur le Kahlenberg, on paye par kilomètre, en semaine, $0^f,291$ à la montée et $0^f,194$ à la descente; le dimanche, $0^f,194$ à la montée et $0^f,145$ à la descente. Sur le Schwabenberg, au contraire, c'est le dimanche que le prix fort est appliqué; les taxes kilométriques sont les suivantes : semaine, $0^f,25$ à la montée et $0^f,17$ à la descente; dimanches et fêtes, $0^f,33$ à la montée et $0^f,25$ à la descente.

La comparaison de ces tarifs avec ceux des chemins de fer ordinaires est intéressante; mais elle demande à être faite avec certaines précautions. D'abord, les tarifs variant, et souvent du simple au double, pour la montée et la descente, c'est la moyenne des deux prix qu'on doit considérer. En second lieu, il ne faut pas essayer de rapprocher les taxes kilométriques en vigueur sur les chemins à crémaillère de celles qui sont appliquées sur nos lignes françaises; ces taxes sont hors de proportion les unes avec les autres, et la comparaison doit être faite entre les prix des chemins à crémaillère d'une part, et, d'autre part, les prix résultant de l'application des tarifs français à des lignes à simple adhérence gravissant la même hauteur que ces chemins et ayant naturellement un plus grand développement. Le point important à considérer, en effet, dans un chemin à

crémaillère, n'est pas sa longueur kilométrique, mais bien la hauteur verticale qu'il sert à racheter; et si l'on veut rapprocher ce chemin d'une ligne à simple adhérence, il y a lieu de donner à celle-ci une longueur qui lui permette d'atteindre le niveau supérieur à l'aide des rampes en usage sur les lignes dont les taxes doivent servir de terme de comparaison.

Nous avons donc réuni dans le tableau suivant les prix des cinq chemins à crémaillère à exploitation commerciale et ceux que donnent les barêmes des compagnies françaises pour des lignes supposées gravir en rampe de 25 millimètres la même hauteur que chacun de ces chemins; l'exagération apparente des premiers disparaît ainsi, et l'on voit que la substitution de lignes à simple adhérence aux chemins à crémaillère ne présenterait pas au public de bien grands avantages au point de vue économique. Hâtons-nous d'ajouter d'ailleurs que cette substitution serait, dans la plupart des cas, absolument impossible, soit en raison de difficultés insurmontables de tracé, soit à cause de l'élévation des frais de construction qui ne trouveraient plus, même dans les trafics actuellement appliqués, une rémunération suffisante.

DÉSIGNATION de la ligne.	LONGUEUR.	HAUTEUR rachetée.	PRIX DES TARIFS EN VIGUEUR			LONGUEUR de la ligne de comparaison à simple adhérence.	PRIX résultant de l'application des tarifs français à la ligne de comparaison.		
			à la montée.	à la descente.	moyen.		1re classe.	2e classe.	3e classe.
	kilomètres.	mètres.	fr.	fr.	francs.	kilom.	francs.	francs.	francs.
Vitznau au Rigi. . . .	7,100	1.311	7,00	3,50	5,25	53	6,50	4,85	3,55
Arth au Rigi.	11,200 dont 9k,8 à crémaillère.	1.332	8,00	4,00	6,00	54	6,65	5,00	3,65
Kahlenberg.	5,156	285	Semaine. . 1,50 Dimanches et fêtes. 1,00	Semaine. . 1,00 Dimanches et fêtes. 0,75	1,25 0,875	12	1,45	1,10	0.80
Schwabenberg.	3,000	260	Semaine. . 0,75 Dimanches et fêtes. 1,00	Semaine. . 0,50 Dimanches et fêtes. 0,75	0,625 0,875	11	1,35	0,95	0,75
Rorschach à Heiden.	5,500	390	1re classe. 3,00 2e classe. 1,50	1re classe. 2,00 2e classe. 1,00	2,50 1,25	16	1,95	1,45	1,10

Les prix figurant au tableau ci-dessus sont ceux des billets simples ; mais sur tous ces chemins il existe des billets d'aller et retour, d'abonnement, de famille ou de société, etc., présentant des réductions considérables sur le tarif ordinaire.

Le transport des bagages est taxé sur ces diverses lignes à des prix proportionnellement plus élevés encore que ceux des voyageurs. Quant aux transports de marchandises, ils n'offrent quelque intérêt que sur la ligne de Rorschach à Heiden, où les marchandises, divisées en deux classes, payent d'un bout à l'autre de la ligne $0^f,40$ et $0^f,30$ par quintal de 50 kilog., soit par tonne kilométrique $1^f,45$ et $1^f,10$. Il existe de plus un tarif spécial en vertu duquel les pierres sont transportées par wagon complet de Wienachten à Rorschach ($2^k,5$) à raison de $0^f,07$ par quintal, ce qui revient à $0^f,56$ par tonne et par kilomètre.

Nous nous sommes étendu avec quelques détails sur les chemins de fer à crémaillère et roue dentée, parce que ce système nous paraît fournir la solution la plus générale et la plus avantageuse pour l'établissement des lignes de chemins de fer dans les pays de montagnes.

En effet, les différents modes de traction par moteur fixe et traction funiculaire aujourd'hui en usage, tout en présentant dans certains cas particuliers de grands avantages, ont leur application restreinte par les circonstances toutes spéciales qu'ils exigent. Quant aux dispositions imaginées par M. Agudio, elles constituent un perfectionnement considérable, et il est regrettable que l'occasion ne se soit pas encore présentée d'utiliser, pour un emploi industriel, le système mixte à crémaillère et à traction par câble télodynamique, dont l'essai fait à Lanslebourg, en 1875, avait donné de bons résultats; mais il faut attendre, pour com-

parer ce système de traction aux chemins à crémaillère, qu'il ait été éprouvé comme ceux-ci par une pratique de plusieurs années.

D'un autre côté, l'exploitation d'une ligne de chemin de fer en rampe de 70 millimètres par des machines à simple adhérence doit-elle être considérée comme un fait d'une grande portée, ayant reculé les limites actuelles d'emploi de la machine locomotive? Nous ne le pensons pas. Nous voyons en effet la machine de l'Uetliberg remorquer une charge tout au plus égale à son poids sur la rampe de 70 millimètres (tandis que la crémaillère permet de traîner sur le même profil trois fois le poids de la machine), et encore cette puissance déjà si réduite ne peut-elle être atteinte qu'avec les circonstances atmosphériques les plus favorables. Il est vrai que ces inconvénients n'ont pas grande importance pour un chemin exclusivement consacré à transporter des promeneurs dont l'affluence n'est pas à redouter par le mauvais temps; mais il n'en serait pas de même si la ligne était destinée à un trafic ordinaire de voyageurs ou de marchandises, ou à un service industriel. De plus, et ceci est plus grave, ce n'est pas seulement la puissance de la machine à la montée qui dépend du coefficient d'adhérence, mais encore sa valeur comme frein à la descente; aussi les variations de ce coefficient peuvent-elles avoir la plus fâcheuse influence au point de vue de la sécurité, surtout lorsqu'on donne à retenir à la machine, en descendant, une charge supérieure à celle qu'elle pourrait remorquer à la montée. Il n'est donc pas probable que l'expérience de l'Uetliberg engage les ingénieurs à admettre dorénavant, dans leurs projets de chemins de fer à simple adhérence, des inclinaisons supérieures à celles qui sont actuellement regardées comme compatibles avec les exigences de la machine locomotive ordinaire. La limite de ces inclinaisons semble aujourd'hui fixée à 30 ou 35 millimètres par mètre; il ne serait pas à souhaiter de la voir

dépassée, et une nouvelle élévation ne devrait certainement pas, à notre avis, être considérée comme un progrès.

On voit donc que la crémaillère peut seule donner, d'une manière générale, les moyens de construire une ligne de chemin de fer dans une contrée dont le relief rend impossible un tracé à rampes de 30 ou 35 millimètres, soit à cause des difficultés matérielles d'exécution, soit à cause de l'élévation de la dépense résultant de l'allongement du parcours. Les améliorations apportées par M. Riggenbach à la construction des machines à roue dentée leur permettent maintenant de passer avec la plus grande facilité de la voie ordinaire sur la crémaillère, en remorquant, avec une notable réduction de vitesse il est vrai, la même charge. Elles ont pour effet d'atténuer sensiblement un inconvénient de la crémaillère, son prix élevé, en donnant le moyen d'en réduire la longueur au strict nécessaire, sans exiger pour l'exploitation des diverses parties d'une même ligne des machines de types différents. Il est évident, d'ailleurs, qu'une ligne à crémaillère sera toujours un chemin d'un prix de revient kilométrique élevé, nécessitant par cela même une taxe kilométrique supérieure à celles des chemins de fer ordinaires ; mais si la crémaillère diminue dans une très-notable proportion la longueur du parcours qu'exigerait un chemin à simple adhérence, on ne devra pas s'étonner de payer un tarif kilométrique plus élevé et de marcher à une vitesse inférieure. Les mauvais résultats financiers fournis par plusieurs des lignes à crémaillère ne doivent pas être reprochés au système d'exploitation adopté, mais bien à l'engouement exagéré causé par les brillants succès de la première ligne du Rigi, engouement qui a déterminé la construction de lignes situées dans des conditions de trafic toutes différentes de celles où se trouvait la ligne de Vitznau, sur des points où l'on n'aurait jamais dû faire de chemins de fer d'aucune sorte.

Enfin, une considération importante en faveur de la cré-

maillère, c'est la sécurité qu'elle donne à l'exploitation. Le frein à air qui permet de modérer à volonté la vitesse à la descente, les freins à poulies calées sur l'arbre intermédiaire ou sur celui de la roue dentée, et à l'aide desquels on produit l'arrêt *presque instantané* du train, les freins d'une semblable construction appliqués aux véhicules, dont l'arrêt peut être ainsi obtenu indépendamment de la machine, suffisent à donner toute confiance. Rien n'empêcherait d'ailleurs, comme le propose M. l'inspecteur général Couche (*), de disposer en outre un frein à mâchoires pressant les faces latérales de la crémaillère, afin de prévoir le cas où une rupture des dents de la roue motrice ou de la crémaillère mettrait hors d'usage les autres moyens d'arrêt.

Paris, le 12 juillet 1878.

(*) *Voie, Matériel roulant et Exploitation technique des chemins de fer*, t. II, p. 732.

N° 39

NOTE

SUR

LE DANGER D'EMPLOYER LE PROCÉDÉ DU BAIN-MARIE

POUR DÉGELER LA DYNAMITE

Par M. STROHL, ingénieur des ponts et chaussées.

Le procédé du bain-marie est fréquemment employé sur les chantiers pour dégeler la dynamite. Il est recommandé par les prospectus de l'usine de Paulille pour les cas où l'on aurait que de petites quantités à dégeler, et cette usine fournit même à ses clients pour cet objet un appareil spécial formé de deux cylindres concentriques. On conçoit d'ailleurs, bien qu'ils ne soient recommandés par l'usine que pour de petites quantités, que les ouvriers puissent être tentés de généraliser l'emploi d'un procédé aussi commode et d'un appareil aussi portatif.

De récents accidents, qu'il est utile de porter à la connaissance des lecteurs des *Annales*, nous paraissent cependant établir que ce procédé est extrêmement dangereux et qu'il doit être absolument interdit sur les chantiers aussi bien pour les petites que pour les grandes quantités. Ces accidents tendent à prouver que le dégel au bain-marie amène la séparation de la nitroglycérine et de la matière absorbante. Or on sait que si le maniement de la dynamite offre une entière sécurité lorsque le mélange de la nitroglycérine et de la matière absorbante est parfait, la nitroglycérine libre fait explosion, au contraire, avec une extrême facilité, soit sous l'action du moindre choc, soit au contact du feu.

Le phénomène de la séparation de la nitroglycérine a été constaté tout d'abord et avant tout accident par M. Fraysse, entrepreneur du percement de la galerie du souterrain de Céletz, sur le chemin de fer de Mende à Sévérac-le-Château.

Pour le percement de cette galerie qui a 618 mètres de longueur et traverse des gneiss et des schistes cristallins très-durs, on employait exclusivement la dynamite de Paulille et en majeure partie la dynamite n° 1. Pour dégeler cette matière pendant l'hiver, on employait couramment le seau à dégeler fourni par l'usine. Suivant l'usage, les cartouches étaient posées debout dans le cylindre intérieur et l'eau chaude était versée entre les deux cylindres. On ne tarda pas à remarquer qu'au sortir de l'appareil le papier enveloppant les cartouches était onctueux et paraissait imprégné d'une matière grasse qui ne pouvait être que de la nitroglycérine. Cette matière se rassemblait même sous forme de gouttelettes à l'extrémité inférieure des cartouches. Mis en garde par cette remarque, M. Fraysse eut soin par la suite de débarrasser de leur papier les cartouches sortant de l'appareil à dégeler et d'introduire la dynamite libre de toute enveloppe dans les trous de mine. Mais bientôt un accident, heureusement sans gravité, ayant décidément révélé le danger qu'offrait le procédé du dégel au bain-marie, ce procédé fut entièrement abandonné.

L'appareil réclamant quelques réparations avait été confié à un ferblantier de Marvejols, non sans avoir été préalablement soumis à un nettoyage très-énergique, afin de le débarrasser des parcelles de nitroglycérine qui pouvaient être restées adhérentes à ses parois. Ce nettoyage n'avait pu être assez parfait, car à peine l'ouvrier eut-il approché son fer à souder que le seau vola en éclats entre ses mains, heureusement sans lui porter aucune blessure, la détonation ayant été amortie par le cylindre extérieur.

Peu de temps après, un accident du même genre, mais

plus décisif encore, se produisait sur le chantier du souterrain de Campagnac dépendant de l'entreprise du 10e lot du chemin de fer de Mende à Sévérac. Sur ce chantier on avait également l'habitude de dégeler la dynamite au bain-marie, mais d'une façon plus rustique. Les cartouches à dégeler étant déposées dans un seau, on allait tremper ce seau dans un baquet d'eau qui se trouvait à la forge et qui à d'autres moments servait à tremper les burins.

Un jour, au moment où l'ouvrier forgeron trempait dans cette eau deux burins chauffés au rouge, une détonation se produisit. Le seau à dégeler ne se trouvait heureusement pas sur le baquet à ce moment-là. L'explosion fut cependant assez forte pour projeter l'ouvrier à 3 mètres de distance contre le mur de la forge, et pour briser des burins qui gisaient sur le sol. Quant au baquet, on n'en a pas trouvé trace. L'eau de ce baquet contenait évidemment un peu de nitroglycérine libre, en quantité sans doute infiniment petite, si l'on songe que cette matière avait dû non-seulement suinter à travers le papier des cartouches, mais encore traverser des fuites existant dans le seau, et assez faibles pour être restées inaperçues.

Nous étions sous l'impression des deux faits qui viennent d'être cités, quand les journaux ont porté en France la nouvelle d'une catastrophe terrible survenue à Parme le 23 février dernier, et qui semble corroborer singulièrement les conclusions de la présente note. Nous reproduisons la relation de cet accident telle que nous l'avons lue.

Des officiers d'artillerie se disposaient à faire une expérience sur la force explosive de la dynamite. On avait choisi à cet effet un vieil arbre au tronc fort large qui gisait renversé dans une des allées principales de la promenade publique.

Avant de procéder à la charge, un officier était occupé à dégeler la dynamite. Cette matière était enfermée à cet effet dans des boîtes en fer-blanc plongées dans un bain-marie.

Trouvant que l'opération était trop lente, l'officier se fit apporter un récipient plein de cendres chaudes et y plaça l'une des boîtes.

Presque aussitôt une terrible détonation retentit. Il y eut quinze morts, parmi lesquels des promeneurs ignorant de quoi il s'agissait, qui s'étaient groupés par curiosité autour de l'officier.

Les faits que nous venons de relater démontrent surabondamment que le dégel de la dynamite au bain-marie, est une opération dangereuse, en ce qu'il provoque la séparation de la nitroglycérine. On sait que l'action prolongée de l'humidité peut amener le même résultat. Cette action de l'humidité est-elle dans le bain-marie la cause principale, exaltée seulement par l'effet de l'élévation de la température? ou bien l'équilibre du mélange des deux matières est-il rompu par un passage trop rapide de l'état solide à l'état pâteux ?

Il serait à désirer assurément que des expériences vinssent élucider complétement ce point important de la stabilité mécanique de la dynamite. Le soin de telles expériences incomberait naturellement aux producteurs : elles seraient de leur intérêt autant que de leur devoir. L'emploi de la dynamite s'étendra d'autant plus que la lumière sera mieux faite sur les propriétés physiques de cette matière, d'ailleurs si précieuse pour l'industrie aussi bien que pour nos travaux.

Nous nous bornerons dans cette note à tirer la conclusion pratique qui s'impose, c'est que le dégel de la dynamite au bain-marie doit être interdit sur nos chantiers. Aussi bien peut-on facilement se dispenser de cette opération en faisant usage de poudrières dans lesquelles une épaisse enveloppe de fumier entretienne une température suffisamment élevée pour que les cartouches y soient à l'abri de la gelée.

Il n'est pas inutile d'ailleurs de rappeler à ce propos que

la congélation n'enlève pas à la dynamite ses propriétés explosives.

Il n'y a aucun inconvénient à charger avec de la dynamite gelée. On ne peut cependant se dispenser de ramener à l'état pâteux une cartouche au moins par coup de mine, celle qui doit servir de cartouche amorce et dans laquelle il est nécessaire d'introduire la capsule.

Avec une cartouche congelée, il ne serait pas possible de noyer le fond de la capsule dans la dynamite ; on devrait se contenter d'un simple contact, et l'on s'exposerait à de fréquents ratés.

Marvejols, le 12 octobre 1878.

N° 40

BULLETIN BIBLIOGRAPHIQUE.

Ouvrages français (1879).

ANDRÉ (E.). — L'Art des jardins. Traité général de la composition des parcs et jardins; par Édouard André, architecte-paysagiste. Gr. in-8°, VIII-893 p., avec fig. et 11 pl. en chromolithographie. Paris, lib. Masson.

BONNET (H.). Du louage d'ouvrage et de services, en droit romain; des obligations et de la responsabilité des compagnies de chemins de fer en matière de transports, en droit francais; par Henry Bonnet, avocat à la cour d'appel, Dr en droit. In-8°, 206 p. Paris, imp. et lib. Pichon.

BOUET (M.). — Achèvement des voies ferrées. Étude sur les chemins de fer départementaux économiques à voie étroite; par Maxime Bouet. In-8°, 55 p. Moissac, imp. Guy.

BOUGON (G.). — Des avantages et des inconvénients, au point de vue de l'hygiène, de l'arrosage des villes pendant l'été; par G. Bougon, Dr en médecine. — *Édition* revue avec soin. In-8°, 35 p. Montdidier, imp. Radenez.

CAMBIER (A.). — Guide pratique sur les études, les expropriations et la construction d'un chemin de fer; par Ad. Cambier, chef de section principal aux chemins de fer de l'État. In-8°, VII-158 p. Paris, lib. Bernard.

CAZENEUVE (A.). — Les Chemins de fer à l'Exposition universelle de 1878; par Albert Cazeneuve. In-8°, 197 p. Paris, lib. Guillaumin et Cie.

CHABRIER (E.) et P. DE SINGLY. — Visites des ingénieurs anciens élèves de l'École centrale des arts et manufactures à l'Exposition universelle de 1878 : le Matériel agricole; par MM. E. Chabrier et P. de Singly. In-8°, 19 p. Paris, 18.

CHATIGNIER et C. BARRY. — Commentaire des clauses et conditions générales imposées aux entrepreneurs des travaux des ponts et chaussées; par Chatignier. — 8e *édition*, revue, mise au courant de la jurisprudence, et augmentée du cahier des marchés des travaux du service du génie; par Charles Barry, docteur en droit. In-12, IV-319 p. Paris, lib. Marchal, Billard et Cie. 4 fr.

Chemins de fer (les) de l'Europe en exploitation. Nomenclature des compagnies, lignes composant leurs réseaux respectifs, longueurs kilométriques. Annexe à la carte des chemins de fer de l'Europe. In-18 jésus, VI-110 p. Paris, imp. et lib. Chaix et Cie. 2 fr.

Chéry. — Constructions en bois et en fer. Troisième partie, première section. Dispositions économiques des travures en bois pour planchers; par J. Chéry, professeur de constructions à l'École d'application de l'artillerie et du génie. In 4°, 44 p. et planche. Paris, lib. Ducher et Cie.

Cheysson (E.). — Rapport à la commission permanente du Congrès international de statistique, sur les méthodes de statistique graphique à l'Exposition universelle de 1878; par E. Cheysson, Directeur des cartes, plans et archives et de la statistique graphique au ministère des travaux publics. In-8°, 15 p. Nancy, imp. et lib. Berger-Levrault et Cie; Paris, même maison.

Daymard (J. L.). — Quelques observations sur le service des chemins vicinaux; par M. J. L. Daymard, ingénieur des arts et manufactures. In-12, 24 p. Cahors, imp. Brassac fils.

Drapier (A.). — Arcs et rayons de segments de cercle. Tables des longueurs calculées suivant les valeurs numériques de la corde et de la flèche, à l'usage des ingénieurs, etc.; par A. Drapier, licencié ès sciences. In-18 jésus, 27 p. Soissons, imp. Michaux.

Dubois (F.). — Annuaire officiel des chemins de fer, contenant un résumé analytique des documents législatifs, historiques, statistiques, administratifs et financiers relatifs aux chemins de fer français et étrangers; par Frédéric Dubois, D^r^ en droit. 28e année. Exercice 1876. In-18 jésus, VIII-340 p. Paris, imp. et lib. Chaix et Cie.

Duponchel (A.). — Traction des bateaux sur les rivières, et installation d'usines électriques de travail. Notes soumises à la commission supérieure d'aménagement et d'utilisation des eaux; par A. Duponchel, ingénieur en chef des ponts et chaussées. In-8°, 27 p. Montpellier, imp. Boehm et fils.

Durand-Claye (A.). — Situation de la question des eaux d'égout, et de leur emploi agricole en France et à l'étranger; par M. Alfred Durand-Claye, ingénieur des ponts et chaussées. In-8°, 15 p. Nancy, imp. et lib. Berger-Levrault et Cie; Paris, même maison.

Endrès. — De la limite d'ouverture des ponts suspendus; par M. Endrès. In-8°, 16 p. Toulouse, imp. Douladoure.

Entz (H.). — Les Chemins de fer et les Transports militaires; par

Henri Entz, ancien officier de cavalerie. In-8°, 23 p. Paris, imp. Turfin et Juvet.

Évrard (A.). — Note sur les cordages en usage sur les plans inclinés ; par M. Alfred Évrard, ingénieur-directeur de la compagnie houillère de Ferfay. In-8°, 20 p. Lille, imp. Danel.

Fargue. — Ernest Cézanne, notice biographique; par M. Fargue, ingénieur en chef des ponts et chaussées. In-8°, 36 p. Tours, imp. Mame et fils.

Favaro (A.). — Leçons de statistique graphique, traduites de l'italien, par M. Paul Terrier. Paris, Gauthier-Villars.

Fluviographe pour le règlement des retenues formées par les barrages mobiles à l'Exposition universelle de 1878. In-4°, 11 p., avec fig. Paris, imp. Chaix et C[ie]; Collin, 118, rue Montmartre.

Francq (L.). — La Locomotive sans foyer appliquée aux tramways et aux chemins de fer sur routes, système Francq et Lamm. Communication de M. Léon Francq, ingénieur civil, à l'Association française pour l'avancement des sciences, congrès de Paris, du mois d'août 1878. In-8°, 38 p. et 2 pl. Paris, imp. Guérin; 27, chaussée d'Antin; les principaux libraires de France et de l'étranger.

Gazeau de Vautibault. — Le Trans-Saharien, chemin de fer d'Alger au Soudan à travers le Sahara; par Gazeau de Vautibault, président de la commission du Trans-Saharien. In-4° à 2 col., 24 p. Paris, tous les lib.; aux bureaux de la France coloniale. 50 c.

Gauckler. — La Pisciculture et le Repeuplement des cours d'eau. Note; par Gauckler, ingénieur en chef des ponts et chaussées, chargé de la pêche. In-8°, 18 p. Épinal, imp. Busy.

Gaussin et Hatt. — Annuaire des marées des côtes de France pour l'an 1880 ; par M. Gaussin, ingénieur-hydrographe de première classe, et M. Hatt, sous-ingénieur-hydrographe de première classe. In-18, IX-312 p. Paris, lib. Challamel aîné. 1 fr.

Gobert (J. B.). — Nouvelles recherches sur la théorie des voûtes. Méthode graphique pour déterminer la courbe de pressions unique donnant la plus petite épaisseur de clef et la section minima d'une voûte en berceau, suivie d'applications à divers ponts, etc.; par J. B. Gobert, ingénieur des arts et métiers. In-8°, IV-96 p. et 3 pl. Paris, imp. Capiomont et Renault.

Heuzé (L.). — Paris. Chemins de fer métropolitains à air libre dans une voie spéciale avec passage couvert pour piétons, etc.; par Heuzé, architecte. In-4°, 2 p., 1 carte et 1 plan. Paris, lib. A. Lévy 3 fr.

Hoslin (C.). — Les limites de l'intérêt public dans l établissement des chemins de fer; par C. Hoslin, ingénieur en chef des ponts et chaussées. In-8°, 11 p. Marseille, imp. Saint-Joseph.

La Gournerie (Jules de). — Les Chemins de fer rachetés. Notes; par Jules de La Gournerie, membre du conseil général de la Loire-Inférieure. In-8°, 21 p. Nantes, imp. Forest et Grimaud.

—— Note sur un appareil destiné à faire connaître la direction de la pression dans une arche biaise; par M. de La Gournerie, membre de l'Institut, inspecteur général des ponts et chaussées. In-4°, 7 p. et pl. Paris, imp. Chamerot.

Lawson (J.). — Voie métallique pour chemins de fer, système breveté de Wood; par John Lawson. In-8°, 8 p. avec fig. Paris, imp. et lib. Lacroix. 75 c.

Mallet (A.). — Les Locomotives à l'Exposition universelle de 1878; par A. Mallet, ingénieur. In-8°, VIII-99 p., avec un tableau et 2 pl.; Paris, lib. Baudry.

Mathieu (H.). — Visites des ingénieurs anciens élèves de l'École centrale des arts et manufactures à l'Exposition universelle de 1878. Le Matériel fixe des chemins de fer; par M. Henry Mathieu, In-8°, 23 p.; Paris, 18, rue La Fayette.

Ministère des travaux publics. — Catalogue des échantillons de matériaux de construction réunis par les soins du ministère des travaux publics, pour la France, à l'Exposition universelle de 1878. Gr. in-8°, VII-439 p. Paris, lib. Dunod.

Pagezy (J.). — Mémoires sur le port d'Aigues-Mortes; par Jules Pagezy, de l'Académie des sciences et lettres de Montpellier. In-8°, VIII-443 p. et 3 cartes. Montpellier; Paris, lib. Hachette et Cie. 6 fr.

Pagot. — Retraite des cantonniers calculables par eux-mêmes, à l'usage des cantonniers des ponts et chaussées et de tous les déposants à la caisse des retraites pour la vieillesse; par Pagot, conducteur des ponts et chaussées. In-8°, 31 p. Saumur, imp. Godet; l'auteur. 70 c.

Passerat de La Chapelle de Bellegarde et J. Brassine. — Réflexions sur les chemins de fer stratégiques de l'Est; par Passerat de La Chapelle de Bellegarde, capitaine de cavalerie en retraite, et J. Brassine, ingénieur. In-4°, 7 p. et carte. Toul, imp. Lemaire.

Pernolet (A.). — L'Air comprimé et ses applications; production, distribution et conditions d'emploi; par M. A. Pernolet, ingénieur. In-8°, XI-598 p., 6 tableaux et 3 p. Paris, lib. Dunod.

Pereire (I.). — La Question des chemins de fer; par Isaac Pereire.

In-8°, 215 p. (avec 5 cartes indiquant la formation successive des réseaux). Paris, imp. Motteroz. 2 fr.

PONTS VOLANTS en bois. — Étude sur divers systèmes de ponts volants en bois de petites dimensions, sans entailles d'assemblage, etc. Système Bouilliant. In-fol., 22 p. et 5 pl. Paris, imp. Desnos.

PORTS MARITIMES de la France. T. 3. De Cherbourg à Argentan. (Ministère des travaux publics.) In-8°, 798 p. avec 8 pl., et grav. Paris, Imp. nationale.

POUCHET (J.) et G. SAUTEREAU. — Canal interocéanique maritime de Nicaragua. Notes et documents présentés au congrès de géographie de Paris du 15 mai 1879, à l'appui du projet de M. Ar. P. Blanchet; par MM. J. Pouchet et G. Sautereau, ingénieurs civils. In-4°, 95 p. et planches. Paris, lib. Denné. 4 fr.

REBOLLEDO (D. J. A.). — Traité général de construction; par D. José Rebolledo, ingénieur en chef et professeur. In-8°, XII-388 p.; accompagné d'un atlas in-4° de 35 pl. doubles. Paris, imp. et lib. Lacroix. 45 fr.

ROYOU (A. de). — Traité pratique de la voirie de Paris, comprenant l'examen raisonné des règlements applicables aux constructions, suivi d'un appendice renfermant dans un ordre chronologique le texte des lois, décrets et ordonnances rendus sur la matière; par A. de Royou, architecte, commissaire-voyer principal de la ville de Paris. Ouvrage à l'usage des architectes, entrepreneurs et propriétaires. In-8°, XIII-328 p. et pl. Paris, imp. Malteste et Cie; l'auteur, 123, rue Saint-Lazare. 8 fr.

SÉRIE MOREL. — Prix de base et de règlement applicables aux travaux de bâtiment exécutés en 1879 et 1880, conformes à ceux de la série officielle et administrative des prix de la ville de Paris. *Édition* de 1879-1880. In-4°, 334 p. Paris, imp. et lib. Marchal, Billard et Cie. 10 fr.

SÉRIE OFFICIELLE des prix de la ville de Paris, applicables aux ouvrages de toute nature à exécuter en 1879-1880 pour le compte de l'administration municipale. (Préfecture du département de la Seine. Direction des travaux de Paris.) In-4°, 922 p. Paris, imp. et lib. Chaix et Cie. 30 fr.

SEYRIG (T.). — Le Pont sur le Douro, à Porto. Description des projets présentés au concours; description détaillée de l'ouvrage exécuté; calculs de résistance relatifs à celui-ci; par T. Seyrig. In-8°, 80 p. et 4 pl. Paris, imp. Capiomont et Renault.

THIOLLET. — Serrurerie et fonte de fer; application aux planchers et combles, aux ponts, escaliers, machines diverses, portes, de-

vantures de boutiques, grilles, candélabres, poêles, etc.; dessiné et gravé par Thiollet. In-folio à 2 col., 36 p. et atlas de 72 planches. Paris, Librairie centrale d'architecture. (Ve Morel.)

THOMASSET. — Visites des ingénieurs anciens élèves de l'École centrale des arts et manufactures à l'Exposition universelle de 1878. Essais sur la résistance des matériaux; par M. Thomasset In-8°, 22 p. Saint-Germain, imp. Bardin.

VASSELOT DE RÉGNÉ (De). — Notice sur les dunes de la Coubre (Charente-Inférieure); par M. de Vasselot de Régné, inspecteur des forêts. In-4°, 78 p. et carte. Paris, Imprimerie nationale.

VAUTHELERET (M. de). — Le Grand Saint-Bernard et le Col de Tende; ligne ferrée directe de Londres à Brindisi, avec jonction à la Méditerranée; par le baron Marius de Vautheleret, ingénieur. In-8°, 60 p. et 2 cartes. Nice, imp. Malvano-Mignon.

VAUTHIER (L. L.). — Projet de réorganisation des chemins de fer français, réseau national et réseaux régionaux. Projet de loi de rachat et de réorganisation, précédé d'un exposé des motifs, avec deux cartes à l'appui; par L. L. Vauthier, membre du conseil général de la Seine. In-8°, 40 p. Paris, imp. et lib. Chaix et Cie. 2 fr.

VERNIS. — L'Histoire des anciennes eaux de Paris, par M. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées : notice par M. Vernis. In-8°, 29 p. Besançon, imp. Dodivers et Cie.

N° 41

MÉTHODE EXPÉDITIVE
POUR L'ÉVALUATION APPROCHÉE
DES VOLUMES DES TERRASSEMENTS
ET DES SUPERFICIES OCCUPÉES
POUR UN AVANT-PROJET DE CHEMIN DE FER
DE ROUTE OU DE CANAL

Par M. LALANNE, inspecteur général des ponts et chaussées.

Exposé. — La Direction des chemins de fer de l'État, justement désireuse de produire, dans le délai le plus rapproché possible, les études nécessaires à l'exécution des lignes ou portions de lignes dont elle est chargée, a fait à l'auteur de cette note l'honneur de lui demander communication détaillée de diverses méthodes abréviatives dont il a fait usage à différentes époques, pour des projets de routes ou de chemins. soit en France, soit à l'étranger. Autant qu'il a pu en juger par la manière dont elles ont été accueillies et pratiquées par le personnel des services techniques de la direction, l'auteur espère que, parmi les lecteurs des *Annales*, il en est qui trouveront aussi quelque intérêt dans ces méthodes et qui les emploieront, au moins à titre d'essai, le cas échéant. C'est dans cet ordre d'idées qu'il s'est placé en demandant l'insertion, dans ce recueil, de quelques notes auxquelles le développement considérable des travaux publics donne un certain caractère d'opportunité.

But de la présente note. — Lorsque le tracé d'une voie

de communication à ouvrir a été arrêté provisoirement sur le terrain ou sur une carte, et que l'on a, soit par un nivellement direct, soit à l'aide des courbes de niveau et des cotes inscrites sur la carte, déterminé le profil en long du terrain naturel d'abord, du milieu de la plate-forme des terrassements ensuite, il est utile de connaître approximativement le volume des terrassements et la superficie des emprises qu'exigerait l'exécution, d'après un *gabarit* ou profil en travers déterminé, suivant le tracé et le profil en long projetés. La détermination exacte de ce volume et de cette superficie exigerait la connaissance des profils en travers du terrain naturel, à des distances suffisamment rapprochées, et comporterait des calculs qui, malgré l'emploi des tables les plus parfaites et les plus faciles à manier, sont toujours assez longs pour qu'on puisse chercher à les éviter, si cela est possible, lors de chacun des tâtonnements successifs par lesquels doit passer un projet bien élaboré. Or cette possibilité existe lorsque le terrain naturel s'éloigne peu de l'horizontalité de part et d'autre de l'axe du tracé. Dans ce cas, on se passe des profils en travers et l'on n'entreprend pas la série des calculs ordinaires qui ne conduisent à la connaissance des volumes des terrassements et des superficies d'emprises qu'après la détermination des surfaces et des largeurs dans ces profils. Au moment d'exposer le procédé dont nous nous servions dès 1835 pour des études de routes dans le département de la Manche, nous devons reconnaître que la simplicité en est si grande qu'il ne nous est guère permis de douter qu'il n'ait été employé plus d'une fois. Notre seule excuse vis-à-vis des lecteurs des *Annales* auxquels nous osons offrir une méthode aussi élémentaire, consiste en ce que cette méthode est véritablement utile dans beaucoup de cas et qu'elle ne paraît pas avoir été déjà publiée.

Elle n'a pas, d'ailleurs, d'autre but que de fournir des *indications provisoires et approximatives* sur les éléments

de la dépense afférente aux terrassements et aux superficies à exproprier; et par conséquent de faciliter la comparaison entre diverses solutions que comporte l'étude d'un projet, lorsque l'on fait varier le tracé en plan et la répartition des déclivités sur le profil en long, pour chercher à obtenir, avec les moindres mouvements de terre, les plus petites déclivités possibles.

Elle suppose nécessairement :

1° Le terrain naturel horizontal dans le sens des profils transversaux ;

2° L'équidistance des profils en travers dans lesquels sont prises les cotes de déblai ou de remblai sur l'axe.

Démonstration des formules employées dans cette note. — On a démontré ailleurs (voir *Tables nouvelles*, etc., Imprimerie royale, 1839, et *Collection de tables*, etc., p. XIV, Carilian-Gœury et Victor Dalmont, 1843, in-4°) que, pour le cas d'un terrain horizontal dans le sens transversal, la superficie D d'un profil entier en déblai a pour expression :

$$D = \frac{(l''t + d)^2}{t} - (l''^2 t - 2F),$$

l'' étant la demi-largeur de la plate-forme en couronne y compris le fossé, F la superficie du fossé, t la déclivité du talus et d la cote en déblai sur l'axe; et que la superficie R d'un profil transversal en remblai est

$$R = \frac{(lt + r)^2}{t} - l^2 t,$$

l et r ayant des significations analogues à l'' et à d (l demi-largeur de la plate-forme, r cote en remblai sur l'axe).

Si l'on suppose $t = \frac{2}{3}$, tant pour le déblai que pour le remblai, la distance constante entre deux profils consécutifs étant δ, on aura, en faisant la somme de tous les

volumes partiels calculés par la méthode ordinaire qui les évalue en multipliant la demi-somme de deux profils voisins par la distance qui les sépare :

Volume du déblai :

$$V_d = \delta\left[2l''\left(\frac{d_0+d_n}{2}+\Sigma d\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{d_0^2+d_n^2}{2}+\Sigma d^2\right)+2nF\right];$$

puis

Volume du remblai :

$$V_r = \delta\left[2l\left(\frac{r_0+r_n}{2}+\Sigma r\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{r_0^2+r_n^2}{2}+\Sigma r^2\right)\right].$$

Le nombre des profils de o à n est de $n+1$; les cotes extrêmes sont d_0 et d_n pour le déblai ; r_0 et r_n pour le remblai. Σd et Σr indiquent respectivement la somme des cotes intermédiaires en déblai et en remblai au nombre de $n-1$; Σd^2 et Σr^2 les sommes des carrés de ces mêmes cotes.

On obtiendra donc, soit le volume de déblai d'une tranchée, soit le volume de remblai d'une levée, au moyen de la formule générale :

$$(a) \quad V = \delta\left[A\left(\frac{y_0+y_n}{2}+\Sigma y\right)+\frac{1}{t}\left(\frac{y_0^2+y_n^2}{2}+\Sigma y^2\right)\right],$$

dans le deuxième membre de laquelle on aura soin d'introduire un terme additif égal à $2n\delta F$, dans le cas du déblai, si le demi-gabarit admet un fossé dont la superficie est F. Le nombre total des profils de o à n est $n+1$, et les sommes Σy, Σy^2 ne s'appliquent qu'aux cotes comprises entre les cotes extrêmes. A représente la largeur de la plate-forme entière, soit en déblai ($2l''$), soit en remblai ($2l$).

Gabarits adoptés. — Les gabarits adoptés pour les chemins de fer de l'État sont, pour des terres de nature ordinaires, établis de la manière suivante :

A DEUX VOIES :

En déblai. — Largeur totale de la plate-forme, $11^m,60$, soit $5^m,80$ de chaque côté de l'axe, y compris un fossé de 1 mètre d'ouverture en couronne, de $0^m,17$ en plafond et $0^m,33$ de profondeur, le talus de la tranchée dans toute sa longueur jusqu'au fond du fossé étant incliné à 3 de base pour 2 de hauteur, et le petit talus du fossé, contigu à la plate-forme, étant à 45°.

En remblai. — Largeur de la plate-forme en couronne, $9^m,60$, soit $4^m,80$ pour la demi-largeur. Talus inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur.

A VOIE UNIQUE :

En déblai. — Largeur totale de la plate-forme, 8 mètres, soit 4 mètres de chaque côté de l'axe, y compris un fossé de mêmes dimensions que pour le gabarit à 2 voies.

En remblai. — Largeur comprise entre les arêtes des talus, 6 mètres. Talus de remblais inclinés à 3 de base sur 2 de hauteur.

N. B. — Il résulte des dimensions énoncées que la superficie F du fossé est

$$(1^m,0+0^m,17)\times\frac{0,33}{2}=\frac{1}{2}\times\frac{7}{6}\times\frac{1}{3}=\frac{7}{36}\text{ de m.q.}=0^{m2},19444\ldots$$

Formules applicables aux chemins de fer de l'État (terrassements). — Les formules, dans ces hypothèses, seront :

VOLUMES DES TERRASSEMENTS POUR LE GABARIT A DEUX VOIES.

Déblais :

$$V_d=\delta\left[11,60\left(\frac{y_0+y_n}{2}+\Sigma y\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{y_0^2+y_n^2}{2}+\Sigma y^2\right)+\frac{7}{18}n\right],$$

Remblais :

$$V_r=\delta\left[9,60\left(\frac{y_0+y_n}{2}+\Sigma y\right)+\frac{3}{2}\left(\frac{y_0^2+y_n^2}{2}+\Sigma y^2\right)\right];$$

VOLUME DES TERRASSEMENTS POUR LE GABARIT A UNE VOIE.

Déblais :

$$V_d = \delta\left[8\left(\frac{y_0 + y_n}{2} + \Sigma y\right) + \frac{3}{2}\left(\frac{y_0^2 + y_n^2}{2} + \Sigma y^2\right) + \frac{7}{18}n\right].$$

Remblais :

$$V_r = \delta\left[6\left(\frac{y_0 + y_n}{2} + \Sigma y\right) + \frac{3}{2}\left(\frac{y_0^2 + y_n^2}{2} + \Sigma y^2\right)\right].$$

On simplifiera grandement l'usage de ces formules :

1° En prenant un nombre rond, tel que 50 ou 100 mètres, pour la distance constante de deux entre-profils;

2° En faisant usage d'une table de carrés des nombres naturels (Claudel).

Formules simplifiées. — Une nouvelle hypothèse donne lieu à des calculs plus simples encore et d'une approximation cependant suffisante, lorsqu'il s'agit de terrassements qui s'étendent sur une assez grande longueur, soit en déblai, soit en remblai.

En effet, les termes $\frac{1}{2}(y_0 + y_n)$, $\frac{1}{2}(y_0^2 + y_n^2)$ des formules précédentes ne s'y trouvent que parce que, en général, une tranchée ou une levée complète est terminée de part et d'autre à des points de passage tombant chacun dans un entre-profil. Si l'on supposait que le point de passage, à l'origine de la tranchée ou de la levée, est *reculé* ou *avancé* jusqu'au profil qui *précède* ou qui *suit* immédiatement, et que le point de passage où se termine, soit la tranchée, soit la levée, est *avancé* ou *reculé* jusqu'au profil qui *suit* ou qui *précède* immédiatement, il résulterait de cette double hypothèse qu'on aurait :

$$y_0 = 0 \quad \text{et} \quad y_n = 0;$$

de sorte que la formule (*a*) deviendrait :

$$(b) \qquad V_d = \delta\left(A\Sigma y + \frac{3}{2}\Sigma y^2 + 2nF\right),$$

dans le cas du déblai, et

$$(c) \qquad V_r = \delta\left(A\Sigma y + \frac{3}{2}\Sigma y^2\right),$$

dans le cas du remblai.

Or il est toujours facile de s'y prendre de telle façon que la tranchée ou la levée dont il s'agit d'évaluer le volume ne diffère pas sensiblement de celle qu'on étend ou qu'on restreint un peu vers les extrémités, de manière, par conséquent, à rentrer dans le cas simple que nous venons d'indiquer.

Établissement des formules pour le calcul des superficies occupées. — On a démontré pareillement (*Collection de tables* déjà citée) que, toujours dans l'hypothèse du terrain horizontal, l'emprise occupée par une plate-forme dont la largeur totale est A, la cote sur l'axe étant y, a pour expression :

$$L = \frac{At + 2y}{t}.$$

La somme des trapèzes qui correspondent à $n + 1$ profils transversaux consécutifs en déblai ou en remblai, et qui constituent l'emprise totale d'une tranchée ou d'une levée, aura donc pour expression, en prenant toujours les mêmes notations et faisant $t = \frac{2}{3}$:

$$(d) \qquad S = \delta\left[nA + \frac{1}{t}(y_0 + y_n + 2\Sigma y)\right].$$

Σy dans cette formule, comme dans les précédentes, représente la somme des cotes de déblai ou de remblai inter-

médiaires entre celles des extrémités de la tranchée ou de la levée que l'on considère.

Aux chemins de fer de l'État, on a $A = 11^m,60$ dans le cas du déblai, et $A = 9^m,60$ dans le cas du remblai, pour le gabarit à deux voies; $A = 8^m$ dans le cas du déblai, et $A = 6^m$ dans le cas du remblai, pour le gabarit à une voie; et enfin $t = \frac{2}{3}$.

De là les quatre formules suivantes :

SUPERFICIES DES EMPRISES POUR LE GABARIT A DEUX VOIES :

D'une tranchée. . $S_d = \delta\left[11,60n + \frac{3}{2}(y_0 + y_n) + 3\Sigma y\right]$;

D'une levée. . . . $S_r = \delta\left[9,60n + \frac{3}{2}(y_0 + y_n) + 3\Sigma y\right]$.

SUPERFICIES DES EMPRISES POUR LE GABARIT A UNE VOIE :

D'une tranchée. . $S_d = \delta\left[8n + \frac{3}{2}(y_0 + y_n) + 3\Sigma y\right]$;

D'une levée. . . . $S_r = \delta\left[6n + \frac{3}{2}(y_0 + y_n) + 3\Sigma y\right]$.

Pour les emprises, la table des carrés n'est donc plus d'aucun usage.

Si l'on suppose, comme précédemment, y_0 et y_n nuls, on a pour formule unique simplifiée :

$$(e) \qquad S = \delta(nA + 3\Sigma y),$$

ou, en substituant un talus quelconque t au talus $\frac{2}{3}$, la formule plus générale encore

$$(f) \qquad S = \delta\left(nA + \frac{2}{t}\Sigma y\right).$$

Applications numériques. — Il ne sera pas inutile, pour ne laisser aucun doute sur la pratique de la méthode, de

l'appliquer à une tranchée et à une levée, en prenant le gabarit du chemin de fer de l'État pour une voie, gabarit qui est aussi celui d'un grand nombre de chemins vicinaux.

Les *fig.* 1, Pl. 18, donnent les profils en long d'une tranchée et d'une levée, profils dont les cotes, aux cinq profils équidistants numérotés de zéro à IV, sont égales deux à deux, l'une en saillie, l'autre en creux, relativement à la plate-forme après l'exécution. Cette plate-forme, qui est horizontale sur la gravure, peut avoir une déclivité quelconque en pente ou en rampe dans le sens longitudinal; le calcul du volume ne dépend que des cotes sur l'axe et ne suppose l'horizontalité que dans le sens transversal.

Les *fig.* 2 représentent les dix profils en travers correspondant aux cotes des profils en long, cinq pour la tranchée et autant pour la levée. Les cinq premiers sont établis avec le gabarit à 8 mètres de largeur, y compris les deux fossés mesurés en gueule dans le déblai; les cinq autres sont en remblai à 6 mètres en couronne, les talus étant réglés à 3 de base sur 2 de hauteur dans les deux cas. La distance commune à tous les entre-profils est de 50 mètres.

Le type des calculs pour la tranchée peut être ainsi disposé en ayant d'abord égard aux cotes extrêmes $0^m,35$ et $0^m,50$.

Volume d'une tranchée.

$$V_d = \delta\left[2l''\left(\frac{d_o + d_n}{2} + \Sigma d\right) + \frac{1}{t}\left(\frac{d_o^2 + d_n^2}{2} + \Sigma d^2\right) + 2nF\right].$$

NUMÉROS des profils.		$\left(\frac{d_0 + d_n}{2} + \Sigma d\right)$		$\frac{d^2_0 + d^2_n}{2} + \Sigma d^2$
0	Somme des cotes intermédiaires augmentée de la demi-somme des cotes extrêmes.	0,175	Somme des carrés des cotes intermédiaires augmentée de la demi-somme des carrés des cotes extrêmes.	0,06125
1		1,200		1,44000
2		1,500		2,25000
3		0,900		0,81000
4		0,250		0,12500
Sommes.	....	4,025	....	4,68625
	Largeur de la plate-forme.	8,000	ajoutant moitié.	2,34312
Produits.	....	32,200	....	7,02937

Ajoutons au 1er produit $32,200 = 2l''\left(\frac{d_o + d_n}{2} + \Sigma d\right)$

le 2e. . . . . $7,029 = \frac{1}{t}\left(\frac{d_o^2 + d_n^2}{2} + \Sigma d^2\right)$

et le 3e $0,1944 \times 2 \times 4 = 1,556 = 2nF$.

La somme. . 40,785

étant multipliée par $\delta = 50$

on a. . . 2039,25

Le volume de la tranchée est donc $2039^{mc},25$.

Lorsqu'on néglige les cotes extrêmes, ce qui revient à supposer que la ligne du profil en long (*fig.* 1) part du point O et aboutit au point IV, pendant que les profils O et IV (*fig.* 2) se réduisent aux deux fossés latéraux, on retranche les nombres correspondant à ces profils dans les colonnes 2 et 3 du tableau ci-dessus. Le résultat final se réduit à $1855^{mc},25$, et l'erreur, qui est toujours en moins, se réduit, dans ce cas particulier, à 9 p. 100

La disposition est tout à fait analogue pour l'évaluation de la levée; seulement le terme relatif aux fossés disparaît.

Volume d'une levée.

$$V_r = \delta\left[2l\left(\frac{r_o + r_n}{2} + \Sigma r\right) + \frac{1}{t}\left(\frac{r_o^2 + r_n^2}{2} + \Sigma r^2\right)\right].$$

NUMÉROS des profils.		$\frac{r_o + r_n}{2} + \Sigma r$		$\frac{r^2{}_o + r^2{}_n}{2} + \Sigma r^2$
0	Somme des cotes intermédiaires augmentée de la demi-somme des cotes extrêmes.	0,175	Somme des carrés des cotes intermédiaires augmentée de la demi-somme des carés des cotes extrêmes.	0,06125
1		1,200		1,44000
2		1,500		1,25000
3		0,900		0,81000
4		0,250		0,12500
Sommes.	. . . .	4.025	. . . .	4,68625
	Largeur de la plate-forme.	6,000	Ajoutant moitié.	2,34312
Produits.	. . . .	24,150	. . . .	7,029371

Ajoutons au 1er produit $24,150 = 2l\left(\frac{r_o + r_n}{2} + \Sigma r\right)$

le 2e. . . . . $7,029 = \frac{1}{t}\left(\frac{r_o^2 + r_n^2}{2} + \Sigma r^2\right)$

la somme. 31,179

étant multipliée par $\delta =$ 50

on a. . . 1558,95

Le volume de la levée est donc de $1558^{mc},95$, lorsqu'on a égard aux cotes extrêmes. En considérant celles-ci comme nulles, le premier des produits ci-dessus se réduit à 21,600, le second à 6,750, et la somme étant 28,350, le volume du remblai devient $1417^{mc}.500$, chiffre qui diffère de moins de 8 p. 100 du chiffre véritable.

Passons aux types analogues, qui sont relatifs aux superficies occupées tant pour le déblai que pour le remblai, avec les mêmes données que ci-dessus et conformément aux *fig.* 3.

Superficie occupée par la tranchée.

$$S_d = \delta\left[2nl'' + \frac{1}{t}(d_o + d_n) + \frac{2}{t}\Sigma d\right].$$

Ici nous avons $2nl'' = 4 \times 8 = 32,000$

$\frac{1}{t}(d_o + d_n) = \frac{3}{2}(0,35 + 0,50) = 0,85 + 0,425 =$ 1,275

$\frac{2}{t}\Sigma d = 3\Sigma d = 3(1,20 + 1,50 + 0,90)$. . . . . = 10,800

44,075

Multipliant par $\delta = 50$, il vient. . . . . . . $2203^{m2},75$

En négligeant les cotes extrêmes, on a. . . 2140 ,00

résultat qui diffère du précédent de moins de 3 p. 100.

Superficie occupée par la levée.

$$S_r = \delta\left[2nl + \frac{1}{t}(r_o + r_n) + \frac{2}{t}\Sigma r\right].$$

On a : $2nl = 4 \times 6 = 24,000$

$\frac{1}{t}(r_o + r_n)$ et $\frac{2}{t}\Sigma d$ } comme ci-dessus, les *r* remplaçant les *d*. { 1,275 / 10,800

36,075

Multipliant par $\delta = 50$ . . . . $1803^{mc},75$

En négligeant les cotes extrêmes, on a . . 1740 ,00

résultat qui ne diffère pas du précédent de plus de 3 ½ p. 100.

L'erreur commise en considérant les cotes extrêmes comme nulles est d'ailleurs d'autant moindre que le nombre total des cotes intermédiaires et que leur valeur absolue sont plus considérables.

Dans ces deux derniers exemples, nous n'avons pas disposé les calculs sous forme de tableau, à cause du petit nombre des cotes intermédiaires. Il est clair que, généralement, il faudra prendre pour les superficies un type de calcul analogue à celui qui a été proposé plus haut pour les volumes.

Considérations relatives à l'emploi de la méthode en dehors du cas de l'horizontalité du terrain naturel. — Nous avons insisté, au commencement de cet exposé (pages 64 et 65), sur les conditions dans lesquelles on peut employer utilement la méthode abrégée, et nous avons placé l'horizontalité du terrain naturel dans le sens transversal au premier rang de ces conditions. Il est bien certain, cependant, que si le terrain naturel s'éloigne peu de l'horizontalité, on peut user encore de cette méthode, sous la réserve de ne considérer les résultats fournis par elle que comme des indications provisoires et approximatives.

Un exemple, dont les calculs élémentaires ont été donnés en détail dans les *Tables nouvelles*, publiées en février 1879, fournit, à ce sujet, une indication numérique bonne à noter. Le profil en long d'un tracé pour l'adoucissement de la pente d'Orval, près de Coutances (Manche), présentait sur 411 mètres, à partir de l'origine inclusivement, des cotes en déblai, et les déclivités transversales du terrain naturel, assez peu prononcées d'ailleurs, puisqu'elles n'excédaient pas 0,035 à 0,040, étaient dirigées dans le même sens, c'est-à-dire que si l'on avait une *pente* à gauche de l'axe, on avait une *rampe* à droite. En outre, dans la presque totalité des profils, il n'y avait que du déblai, sans remblai. Dans ces circonstances, pour un gabarit de 10 mètres en couronne, avec fossés latéraux de $1^{m},50$ de largeur en gueule, de $0^{m},50$ de largeur au fond et de $0^{m},50$ de profondeur, le talus de déblai étant supposé à 45°, nous avons trouvé par la méthode ordinaire, en calculant séparément les superficies de douze profils en travers, un volume total de $18\ 301^{mc},694$. La méthode abrégée simplifiée, c'est-à-dire en supposant les cotes extrêmes nulles, nous a donné $17\ 650^{mc},400$. La différence de 651 mètres cubes n'est que la vingt-huitième partie du premier de ces deux nombres. On pourrait donc hardiment conseiller l'emploi de la méthode abrégée dans les cas analogues, mais seulement à titre provisoire et pour

faciliter les études comparatives des avant-projets, malgré l'approximation considérable qu'elle donne. Le peu d'importance de l'erreur commise tient à ce que, pour une déclivité transversale uniforme du terrain naturel, un profil tout en déblai ou tout en remblai offre une superficie totale peu différente de celle qu'il aurait si le terrain naturel était horizontal; le triangle en excès, d'un côté de l'axe, au-dessus de l'horizontale, étant *à peu près* équivalent, dans les cas moyens, au triangle en moins au-dessous de cette horizontale de l'autre côté de l'axe. Cette équivalence est d'autant plus approchée que la déclivité transversale est plus faible et la cote sur l'axe plus forte.

C'est ce qui résulte manifestement de l'expression de la différence Δ qui existe entre les deux superficies calculées pour une cote y sur l'axe, l'inclinaison du terrain naturel étant x, positive en rampe, négative en pente, et le talus réglé à t de hauteur pour 1 de base, la largeur de la demi-plate-forme étant l; car on a, pour $y \geqq lx$,

$$\Delta = \frac{x(lt+y)^2}{2(t^2-x^2)};$$

pour $x=0$, $\Delta=0$. La plus grande valeur de Δ, t étant supposé égal à 1, a lieu pour le maximum de x, qui est ordinairement de $\frac{1}{2}$; elle est $\frac{1}{3}(l+y)^2$, pour toute valeur de y au moins égale à $\frac{1}{2}l$. A cette valeur de y correspond $\Delta=\frac{3}{4}l^2$, comme on peut s'en assurer *à posteriori* par la construction d'une figure.

Mais lorsqu'on veut obtenir sûrement des résultats exacts, il faut en arriver au calcul des profils, et, si on le peut sans trop de peine, établir d'avance des tables qui renferment les résultats correspondant à une déclivité transversale et à une cote déterminées. La construction des tables graphiques se prête avec une facilité exceptionnelle à la solution de ce problème.

N° 42

NOTE

SUR UNE MÉTHODE GRAPHIQUE

POUR LA DÉTERMINATION

DE LA DISTANCE MOYENNE DE TRANSPORT

DES DÉBLAIS EN REMBLAIS

DANS L'EXÉCUTION DES TRAVAUX DE TERRASSEMENTS

Par M. LALANNE, inspecteur général des ponts et chaussées.

Exposé. — C'est encore sur la demande de la Direction des chemins de fer de l'État que la présente note a été écrite, dans le but d'épargner aux ingénieurs chargés de la rédaction des projets une des opérations de calcul les plus longues et les plus fastidieuses que comporte cette rédaction, ou du moins dans le but d'en atténuer singulièrement la longueur et la difficulté. Nous voulons parler du *Tableau du mouvement des terres et de l'emploi des déblais en remblais*. Il s'agit, pour éviter la rédaction de ce tableau, d'un procédé qui s'applique non plus à un avant-projet, mais à un projet définitif. Les indications qu'il fournit, utiles pour l'exécution, sont indispensables pour l'évaluation des dépenses et même pour le règlement des comptes. Elles sont rigoureusement exactes. Tel est l'objet du procédé que nous allons exposer, bien différent dans son but et dans son essence de la méthode précédemment exposée, qui ne se rapporte qu'à des avant-projets, ne donne que des résultats approximatifs, pour l'évaluation des volumes des terrassements et des superficies occupées, et n'est ap-

plicable que dans les cas où les déclivités transversales du terrain sont faibles.

Le principe essentiel du procédé dont il s'agit a déjà été indiqué dans les *Annales* (2e sem. 1840, p. 3) ; mais on voudra bien permettre à l'auteur de le reprendre, pour le présenter d'une manière plus simple, plus générale et plus pratique à la fois, sauf à répéter quelques passages d'une insertion qui, remontant à une quarantaine d'années, ne peut être connue que de nos plus anciens lecteurs.

Problème à résoudre. — On sait que dans tout projet d'ouvrages neufs qui exigent des mouvements de terre, comme les routes, les chemins de fer, les canaux, etc., il ne suffit pas d'avoir calculé les volumes des déblais et des remblais à faire pour modifier le relief du sol conformément au but qu'on se propose. Il faut encore dresser un état exact de la manière dont les déblais doivent être répartis en remblais ; déterminer les différentes parties dans lesquelles chaque volume de déblai doit être décomposé, pour être transporté le plus près possible ; puis enfin faire la somme des produits de ces volumes partiels par les distances respectives de transport, et diviser cette somme par le volume total des déblais : le quotient donne la distance moyenne du transport des terres de déblai en remblai. Il est bien vrai que cette suite de calculs ne comporte que les quatre opérations élémentaires de l'arithmétique. Il n'en est pas moins vrai qu'elle exige beaucoup d'attention, et qu'elle est aussi longue que fastidieuse.

Application numérique à un exemple. — Prenons pour exemple une partie de route ou de chemin de fer dans laquelle on a levé 21 *profils* en travers cotés de zéro à 20, et par conséquent 20 *entre-profils*, dans quelques-uns desquels on trouve à la fois du déblai et du remblai. On convient que le plus petit des deux chiffres qui expriment ce déblai et ce remblai correspond à un emploi de déblai dans l'entre-profil même, emploi qui se fait au jet de pelle ou

qui, du moins, est compté comme tel. C'est donc de l'excédant seul que l'on a à s'occuper. Si c'est un excédant de déblai, on le porte en remblai à la distance ou aux distances les plus rapprochées possible ; si c'est un excédant de remblai, on ira de même chercher au plus près les déblais en quantité suffisante pour le remplir.

On convient encore, pour simplifier, que le volume excédant sera considéré comme tout entier concentré au milieu même de l'entre-profil, quoique ce milieu ne coïncide généralement pas avec le centre de gravité du volume.

Tous les détails de l'opération sont indiqués dans le tableau ci-après.

Nous n'avons établi, dans la rédaction de ce tableau, aucune distinction entre les différents modes de transport qu'il peut convenir d'employer, suivant les distances, pour porter les déblais en remblai. Il est facile de voir qu'on pourra toujours y trouver les éléments des transports partiels afférents à chacun des modes particuliers dont on peut disposer, et faire alors des sommes partielles de moments dont l'ensemble reproduirait la somme totale. On verra d'ailleurs (page 85) que le procédé graphique se prête, avec une extrême facilité, à des décompositions partielles analogues.

Tableau du mouvement des terres et de leur emploi de déblai en remblai.
(Représenté graphiquement dans la *fig.* 1, Pl. 19.)

INDICATION des entre-profils.	DISTANCES ENTRE les centres des entre-profils.	VOLUME DE DÉBLAI d'après les profils.	VOLUME DE REMBLAI d'après les profils.	EXCÈS DE DÉBLAI.	EXCÈS DE REMBLAI.	EMPLOI AU JET DE PELLE.	DÉTAIL DE L'EMPLOI DES TERRES.	VOLUMES PARTIELS de déblai.	DISTANCES DE TRANSPORT.	MOMENTS DU TRANSPORT.
	mèt.	m. c.	m. c.	m. c.	m. c.	m. c.				
							90 m. c. portés dans l'entre-profil. . . 2—3	90	77	6.93
0—1		845	285	560	»	285	310 . . . . 3—4	310	114	35.34
	49						160 . . . . 4—5	160	177	28.32
1—2		327	187	140	»	187	140 . . . . 4—5	140	128	17.92
	28									
2—3		119	209	»	90	119	90 m. c. pris dans l'entre-profil. . 0—1			
	37									
3—4		»	310	»	310	»	310 . . . . 0—1			
	63						160 . . . . 0—1			
4—5		»	540	»	540	»	540 . . . . 1—2			
							240 . . . . 4—5			
	19						240 m. c. portés dans l'entre-profil. 4—5	240	19	4.56
							65 . . . . 10—11	65	217	14.10
5—6		502	52	450	»	52	110 . . . . 11—12	110	235	25.85
	51						35 . . . . 12—13	35	258	9.03
							50 . . . . 12—13	50	207	10.35
6—7		381	6	375	»	6	140 . . . . 13—14	140	279	39.06
	11						185 . . . . 14—15	185	303	56.05
7—8		105	»	105	»	»	105 . . . . 14—15	105	292	30.66
	77									
							70 . . . . 14—15	70	215	15.05
8—9		75	»	75	»	»	5 . . . . 15—16	5	262	1.3
	46									
9—10		67	22	45	»	22	45 . . . . 15—16	45	216	9.7
	32									
10—11		51	116	»	65	51	65 m. c. pris dans l'entre-profil. . 5—6			
	18									
11—12		9	119	»	110	9	110 . . . . 5—6			
	23									
12—13		»	85	»	85	»	35 . . . . 5—6			
							50 . . . . 6—7			
	72									
13—14		»	140	»	140	»	140 . . . . 6—7			
	24						185 . . . . 6—7			
14—15		»	360	»	360	»	105 . . . . 7—8			
	47						70 . . . . 8—9			
							5 . . . . 8—9			
15—16		»	125	»	125	»	45 . . . . 9—10			
	11						75 . . . . 18—19			
16—17		»	105	»	105	»	105 . . . . 18—19			
	13									
17—18		41	126	»	85	41	85 . . . . 18—19			
	15						75 m. c. portés dans l'entre-profil. 15—16	75	39	2.9
18—19		363	63	300	»	63	105 . . . . 16—17	105	28	2.9
	64						85 . . . . 17—18	85	15	1.2
							35 . . . . 19—20	35	64	2.2
19—20		201	236	»	35	201	35 m. c. pris dans l'entre-profil. . 18—19			
Sommes.	700	3.086	3.086	2.050	2.050	1.036		2.050		313.6

Divisant la somme des moments 313.640 par le volume total de déblai 2.050, on trouve pour quotient la distance moyenne 152^{m},995.

Application du procédé graphique au même exemple. — Sur une ligne horizontale XY (*fig.* 1, Pl. 19) marquons, à une échelle quelconque, des points 1, 2, 3,... jusqu'à 20, dont les distances soient égales à celles des entre-profils, et construisons, dans l'ordre où les opérations successives de notre tableau nous les ont donnés, des rectangles ayant pour hauteurs les déblais partiels à porter en remblais et pour bases les distances respectives auxquelles chaque déblai a trouvé son emploi. La figure sera composée de 19 rectangles correspondant aux 19 produits de la dernière colonne du tableau, rectangles que nous avons teintés et marqués d'autant de numéros d'ordre placés entre parenthèses. Nous expliquerons bientôt ce qu'indiquent les différences de teintes. Leurs limites marquées en traits pleins les rendent faciles à distinguer malgré les traits pointillés verticaux qui traversent un certain nombre d'entre eux.

Ainsi le rectangle (1) a pour base 77^{m} et pour hauteur 90^{m},
. . . . (2) . . . . 114^{m} . . . . 310^{m},
. . . . (3) . . . . 177^{m} . . . . 160^{m},
et ainsi de suite. . . . .

La formation de la figure se comprend d'elle-même, et n'a besoin d'aucune explication détaillée. Chacune des hauteurs correspond à un déblai qui trouve son équivalent dans un remblai dont il est séparé par une distance égale à la base du rectangle. Les cotes inscrites dans le sens vertical indiquent les valeurs absolues des excédants de déblai ou de remblai par entre-profil, et se rapportent aux portions des verticales en traits pleins.

Mais le tracé qui n'est, dans la *fig.* 1, que la traduction graphique par fragments du tableau numérique de la page précédente, n'offrirait pas d'avantage sensible sur l'emploi

de ce tableau. Une transformation très-simple va nous permettre d'en tirer meilleur parti.

En effet, comparons la *fig.* 1 à la *fig.* 2, que l'on a établie de la manière suivante : au-dessus de la base XY on a tracé les gradins verticaux montants D_1, D_2, respectivement proportionnels aux déblais disponibles correspondant aux points 1, 2 ; puis après, les gradins verticaux descendants R_1, R_2, R_3... (qui peuvent dépasser la ligne de terre), et qui sont aussi respectivement proportionnels aux excédants de remblai des points 3, 4 et 5 ; on a pris la nouvelle série des gradins ascendants D_3, D_4, D_5, D_6 et D_7, et ainsi de suite jusqu'au dernier remblai R_{12} qui retombe naturellement sur la ligne de terre (se confondant avec R,20), puisque nous avons supposé, dans les données numériques de la question, l'égalité entre les déblais et les remblais.

On trouve dans les deux figures, à première vue, des portions identiques. Ainsi le rectangle 5, 6, 6 *bis*, R_8, et la réunion des trois rectangles 16, R_9, R_{10}, R_{11}, 19 *bis*, 19, placés au-dessous de la ligne de terre XY, dans la *fig.* 2, sont respectivement égaux aux deux espaces désignés, l'un par (5), l'autre par (16), (17), (18), sur la *fig.* 1. Il en est de même des deux espaces (19) qui terminent les deux figures sur la droite, au-dessus de la ligne de terre. En dehors de ces parties communes, si l'on complète le rectangle 1 AB 5, on voit qu'il est le même, tant sur la première figure que sur la seconde, et que les parties non teintées dans l'une et dans l'autre sont identiques, comme susceptibles de superposition exacte. Le rectangle FCEG de la première figure est pareillement égal au rectangle 6 CE 16 de la seconde, et les remplissages en dehors des parties teintées sont égaux sur l'un comme sur l'autre. Donc les superficies teintées sont les mêmes sur les *fig.* 1 et 2 (*) ; d'où résulte

(*) Il y a plusieurs manières de démontrer l'égalité de superficie des deux polygones orthogonaux des *fig.* 1 et 2. C'est par

qu'il suffit de construire la *fig.* 2, qui n'exige aucune recherche préalable de distribution des déblais en remblais, et d'en mesurer la superficie, pour obtenir la somme des moments qui, divisée par la somme des déblais (égale à celle des remblais), donnera la distance moyenne de transport du déblai en remblai.

Règles pratiques déduites de l'établissement de la fig. 2. — Lorsque l'auteur de cette note eut pour la première fois occasion d'exposer, sous une forme différente, le résultat qu'il vient d'énoncer, résultat auquel il avait été conduit par l'étude des propriétés de l'arithmoplanimètre (*Annales*, 2e sem., 1840), on fit une objection à l'emploi de la méthode qu'il proposait. « Vous nous indiquez », lui disait-on, « un moyen très-simple pour obtenir la distance « moyenne de transport de déblai en remblai; mais il ne « s'agit pas, dans la pratique, d'une semblable moyenne « évaluée en bloc; il faut préalablement faire le départ des « parties de terrassements qui seront portées de déblai en « remblai à la brouette ; puis de celles qu'il faudra porter « au tombereau; enfin de celles qu'il sera plus avantageux « d'exécuter, soit au wagonnet, soit au wagon avec traction « de locomotive sur voies provisoires ou définitives. » Cette objection était parfaitement fondée; car il y a économie évidente à user de la brouette pour de petites distances, et de modes de transport de plus en plus parfaits à mesure que la distance augmente. Il est donc possible que ce qu'il y avait d'incomplet dans la solution proposée, aussi bien que le prix élevé de l'instrument qu'on y adaptait, aient empêché la propagation de l'idée que nous soumettions, dès 1840, à l'appréciation des ingénieurs. Et cependant la

---

l'usage et la théorie de l'arithmoplanimètre que nous avions été conduit à reconnaître cette égalité, dans l'article cité du 2e sem. des *Annales* de 1840. La démonstration nouvelle et très-simple que nous donnons ici est due à M. Henri de Vesly, conducteur attaché au service de l'École des ponts et chaussées.

fig. 2, dont nous venons d'expliquer la construction et qui se trouvait déjà sous le n° 13 dans la Pl. 193 de la première série des *Annales* (2e sem., 1840), renfermait implicitement le principe de la séparation des volumes des terrassements suivant le genre de transport qui convient à chacun d'eux. En effet, si l'on admet que la limite séparative des transports à la brouette et au tombereau soit une distance de 100 mètres, qui, sur la *fig.* 2, correspond à 4 centimètres, on voit tout de suite que les surfaces partielles placées au-dessus des horizontales D_1 2 *bis*, D_5-9 *bis* (prolongées) et 19-20, puis au-dessous de la ligne de terre XY, savoir (5) et (6), (17) et (18), ne comportent pas de transport de déblai en remblai à une distance supérieure à la limite admise. Il suffira donc de mesurer séparément ces surfaces partielles auxquelles on a donné sur la figure une teinte plus foncée : leur somme sera celle des moments de transport à la brouette ; la somme des superficies restantes, qui composent la majeure partie de la *fig.* 2, sera l'équivalent de la somme des moments de transport au tombereau. En divisant chacune des deux sommes partielles par le volume auquel elle s'applique, on aura la moyenne distance relative à chacun des deux genres de transport. Or le volume des déblais, pour la brouette, sera la somme :

$$2\,bis\,D_2 + 6\,bis\,6 + 9\,bis\,D_6 + 10\,bis\,D_7 + 19\,D_8,$$

et pour le tombereau, il sera la différence entre le volume total et la somme de ces volumes partiels.

Le problème est donc résolu, d'une manière absolument intuitive, dans son essence, et les résultats numériques s'obtiennent par des opérations simples résultant de mesures directes sans aucun des tâtonnements, sans aucune des chances d'erreur que comporte la rédaction du tableau d'emploi des terres.

La règle pratique pour suppléer à cette rédaction si fastidieuse peut se résumer ainsi :

Sur une ligne horizontale XY *portant des points de division qui correspondent aux centres des entre-profils, établissez, en correspondance avec chacun de ces points, des échelons orthogonaux montants pour les déblais* 1 D_1, 2 *bis* D_2, *etc., descendants pour les remblais* 3 *bis* R_1, 4 *bis* R_2, *etc., et se succédant sans interruption jusqu'au dernier, qui doit aboutir au point de division* 20 *sur la ligne* XY; *écrêtez, soit au-dessus, soit au-dessous de* XY, *et parallèlement à cette ligne, les parties saillantes dont la longueur sera moindre que celle qui correspond au transport à la brouette; la figure sera décomposée en deux espèces de tranches dont les superficies respectives représenteront les sommes de moments relatives, pour l'une, au transport à la brouette; pour l'autre, au transport au tombereau; et chacune de ces superficies étant divisée par la somme des échelons montants qui s'y rapporte, on obtient la distance moyenne relative à chacun des deux modes de transport.*

Il est bien évident, d'ailleurs, que s'il y a trois ou quatre modes de transport différents, suivant les distances, un second et un troisième prélèvement de tranches parallèles aux XY se fera avec la même facilité.

Conséquences déduites de la comparaison des fig. 1 *et* 2. — Les superficies teintées de ces figures étant égales, il s'ensuit que le découpage par tranches à bases horizontales de la *fig.* 2 doit donner une somme totale de moments égale à celle qui résulte de l'emploi du procédé ordinaire, dont le tableau de la page 6 est l'expression numérique et dont la *fig.* 1 est la représentation graphique. Au demeurant, la manière de procéder qu'indique la *fig.* 2 est bien plus conforme à la réalité des choses. On sait, en effet, que c'est toujours dans le voisinage des points de passage du déblai au remblai qu'on commence, et qu'on opère le transport de l'un à l'autre. C'est ce qu'exprime la *fig.* 2, où l'on voit le déblai D_2 combler le remblai R_1 et une petite partie du remblai R_2; puis en (5) une partie 6 *bis* 6 du déblai D_3

combler une partie $R_3 5$, du remblai R_3, et ainsi de suite.

Le tableau ci-après, dressé d'après ce système et sans avoir égard à la séparation entre divers modes de transport, est la traduction en chiffres du mode d'opérer indiqué par la construction même de la *fig.* 2. Le résultat final est identique à celui du tableau de la page 80, comme on pouvait s'y attendre ; la somme des moments est la même, quoique les éléments partiels soient complétement différents.

Tableau du mouvement des terres et de leur emploi de déblai en remblai

d'après le système représenté graphiquement dans la *fig.* 2, Pl. 19.

NUMÉROS des profils.	EXCÉDANT disponible.		INDICATION DE L'EMPLOI le plus voisin.			MOMENTS du transport.	VOLUME restant disponible.
	Déblai.	Remblai.	Numéro du profil.	Distance.			
							m. cub.
3	»	90	2		28	2.520	50
2	50	»	4	37 + 28 =	65	3.250	260
4	»	260	1	65 + 49 =	114	29.640	300
5	300	»	1	114 + 63 =	177	53.100	240
5*	»	240	6		19	4.560	»
10	45	»	11		32	1.440	20
11	»	20	9	32 + 46 =	78	1.560	55
9	55	»	12	78 + 18 =	96	5.280	55
12	»	55	8	96 + 77 =	173	9.515	50
8	50	»	13	173 + 23 =	196	9.800	35
13	»	35	7	196 + 11 =	207	7.245	340
14	»	140	7	207 + 72 =	279	39.060	200
7	200	»	15	279 + 24 =	303	60 600	160
15	»	160	6	303 + 51 =	354	56.640	290
6	50	»	16	354 + 47 =	401	20.050	75
16*	»	75	19	11 + 13 + 15 =	39	2.925	105
17*	»	105	19	39 — 11 =	28	2.940	85
18*	»	85	19	28 — 13 =	15	1.275	60
19	35	»	20		64	2.240	»
	810	1240	Somme des moments. . . .			313.640	
	2050		Distance moyenne.			152^m,995	

Mais quand on a égard à la séparation des volumes suivant les modes différents de transport, les moyennes partielles cessent d'être les mêmes, sans que la moyenne générale varie.

On peut s'en assurer d'abord à l'inspection des *fig.* 1 et 2 ; car ces deux figures, tout en ayant des parties communes pour le transport à la brouette (5), (16), (17), (18), (19), en ont aussi de différentes. Le rectangle (1) de la *fig.* 1 diffère du polygone orthogonal 2 *bis* D_2 3 *bis* R_1 4 *bis* de la *fig.* 2. Les résultats numériques, dont les éléments sont faciles à extraire des deux tableaux des pages 80 et 86, sont exprimés ci-dessous :

	VOLUMES transportés.	SOMMES des moments de transport.	DISTANCES moyennes du transport.
Figure 1.	mètres cubes.		mètres.
Transports à la brouette.	630	20.870	33,13
Id. au tombereau.	1.420	292.770	206.17
Totaux et moyenne. .	2.050	313.640	152,995
Figure 2.			
Transports à la brouette.	800	27.990	34,99
Id. au tombereau.	1.250	285.650	228,52
Totaux et moyenne. .	2.050	313.640	152,995

Usage de la construction de la fig. 2, *pour déterminer l'emplacement et la quotité des emprunts ou des retroussements à faire.* — L'usage de la *fig.* 2 suppose qu'il y a égalité absolue entre la somme des déblais et celle des remblais ; et il faut bien qu'il en soit finalement ainsi, sauf à *retrousser* le volume de déblai qu'on aurait en excédant ou à *emprunter* de quoi parfaire les remblais auxquels les déblais du corps même de la voie à ouvrir ne suffiraient pas. La construction même de la figure indiquera, d'abord, par la position du dernier point *au-dessus* ou *au-dessous* de la ligne de terre XY, l'excédant de déblai ou de remblai. La division par tranches fera reconnaître ensuite les régions où les transports se font à la plus courte et à la plus

grande distance, et où il convient, par conséquent, de faire soit les emprunts soit les retroussements. La mesure des plus grandes distances et l'application des prix de transport correspondants feront de même reconnaître, par comparaison avec ce que peuvent coûter les retroussements et les emprunts, les cas où il convient d'en faire simultanément, et les points où ils seront le mieux placés. En un mot, la construction à laquelle l'auteur de cette note a été conduit il y a quarante ans, par l'emploi du planimètre d'Oppikofer et d'Ernst, se prête à toutes les exigences du problème, qui consiste à déterminer le meilleur emploi possible des déblais en remblais, le partage le plus économique entre les divers modes de transport, et la distance moyenne afférente à chacun d'eux.

Il est inutile d'ajouter que les gradins ascendants proportionnels aux déblais seront augmentés en ayant égard au foisonnement variable suivant leur nature; et que dans certains cas, beaucoup plus rares, les gradins descendants proportionnels aux remblais seront diminués suivant l'importance présumée des tassements qu'éprouveront les déblais qui doivent les combler.

Construction simple à l'aide de laquelle on peut, sans calcul, obtenir les sommes des moments représentés par les aires de la fig. 2. — Soit $1\,D_1\,2$ *bis* 2 un rectangle quelconque dont il s'agit d'obtenir l'aire $= 1D_1 \times D_1 2$ *bis*. Prenons un point O dans le prolongement de $D_1 1$, tirons O2 que nous prolongerons jusqu'à la rencontre en F de $D_1 2$ *bis* pareillement prolongé, nous aurons $\frac{1O}{D_1\ 2\ bis} = \frac{2\ bis\ 2}{2\ bis\ F}$, d'où $D_1 2\ bis \times 2\ bis\ 2 = O1 \times 2\ bis\ F$; donc si l'on prend $O1 =$ constant et que 2 *bis* F soit mesuré à une règle convenablement graduée, une simple lecture sur cette règle donnera l'aire du rectangle exprimée en unités de superficie, ou le moment qu'exprime le produit de la base par la hauteur.

Supposons que dans la *fig.* 2 les distances des entre-

profils (bases b des rectangles) soient rapportées à l'échelle de $\frac{1}{2\,500}$; les volumes de déblai ou de remblai (hauteur h des rectangles) à l'échelle de $\frac{1}{20\,000}$; il faudra, pour obtenir la véritable superficie bh d'un rectangle exprimée en unités de superficie, multiplier par $2\,500 \times 20\,000$ ou par 50 000 000 le produit obtenu, lorsque b et h sont rapportées à l'unité linéaire. Prenons la distance constante du point O à XY égale à $0^m,025 = \frac{1}{40}$ de l'unité linéaire. Il suffira de multiplier par 1 250 000 la longueur 2 *bis* F rapportée au mètre, pour obtenir le moment cherché. Sur le premier rectangle de gauche de la *fig.* 2, la mesure donne $0^m,022$; la superficie sera donc 27 500. Le calcul exact, avec les données de la question fournit $560 \times 49 = 27\,440$; l'erreur est d'environ $\frac{1}{687}$.

On a tracé sur la *fig.* 2, en partant des points O, O′, O″, O‴, etc., la suite des lignes telles que O2F, O′3F′, etc., qui déterminent sur les bases supérieures des rectangles les segments 2 *bis* F, 3 *bis* F′, etc., proportionnels aux aires de ces rectangles, et donnant par conséquent, en les rapportant à l'échelle convenable, les valeurs numériques des moments partiels dont on cherche la somme pour en déduire la distance moyenne du transport.

On voit d'ailleurs comment on peut obtenir, toujours par une simple différence de longueurs, le moment relatif à un des rectangles fortement teintés du haut de la figure. En effet, le rectangle 2, 3, 3 *bis* D_2 ayant pour mesure 3 *bis* F′, la partie fortement teintée du haut de ce rectangle a pour mesure la différence entre D_2F' et 2 *bis* F″. Cette différence est l'intervalle entre F″ et le pied de la perpendiculaire abaissée de F″ sur D_2F'.

Quant aux aires placées au-dessous de la *ligne de terre*

XY, on leur applique des constructions analogues, après les avoir préalablement rabattues symétriquement au-dessus de cette ligne.

Construction de l'échelle linéaire qui donne les superficies. — Pour généraliser les considérations qui ont servi aux calculs dans l'exemple précédent, lorsque les bases b des rectangles ont été construites à l'échelle de $\frac{1}{m}$ et leurs hauteurs h à l'échelle de $\frac{1}{n}$, en désignant par C la distance constante qui sépare la ligne de terre XY de sa parallèle OO′O″..., et par l la longueur qui est proportionnelle à l'aire du rectangle bh, comme on a $bh = Cl$, on aura pareillement $mnbh = C \,.\, mnl$, si l'on prend C égal à l'unité ; ce qui revient à dire que la valeur de la superficie du rectangle ou du moment équivalent est égale au nombre qu'exprime l mesurée à l'échelle de $\frac{1}{mn}$; et si C devient moitié, tiers ou quart de l'unité, la longueur l devient double, triple ou quadruple, ce qui oblige à réduire le multiplicateur mn dans la même proportion. La graduation d'une échelle mobile sur laquelle on lirait immédiatement le moment ou l'aire vraie du rectangle doit donc être faite à l'échelle de $\frac{1}{mnC}$; et même, sans avoir construit cette échelle, on aura la valeur du moment cherché en mesurant l par rapport à l'unité, et en multipliant par mnC.

Ainsi dans la *fig.* 2 les bases étant construites à l'échelle de $\frac{1}{2\,500}$ et les hauteurs à celle de $\frac{1}{20\,000}$, et la distance O1 étant égale à $0^{m},025$, on a $m = 2\,500$, $b = 20\,000$ et $C = 0^{m},025$; l'échelle devra être construite à raison de $\frac{1}{2\,500 \times 20\,000 \times 0^{m},025} = \frac{1}{1\,250\,000}$, ou à l'échelle de 8 millimètres pour un produit égal à 10 000.

Aussi, lorsque après avoir mesuré la somme des différences telles que 2 *bis* F, D_2F', on trouve que cette somme a pour longueur 250 millimètres, on en conclut que la somme des moments a pour expression

$$0{,}25 \times 1\,250\,000 = 312\,500.$$

Or nous avons vu que cette somme calculée rigoureusement est 313 640. L'erreur est donc de 1 140 sur 313 640 ou d'environ $\frac{1}{275}$.

Les épures construites dans les bureaux de la Direction des chemins de fer de l'État l'ont été à l'échelle de $\frac{1}{5\,000}$, $0^m{,}02$ par 100 mètres pour les distances des profils (bases des rectangles) et de $\frac{1}{200\,000}$ ou $0^m{,}005$ par 1 000 mètres cubes pour les volumes de déblai ou de remblai (hauteurs de ces rectangles). En prenant $O_1 = C = 0^m{,}05$, les longueurs 2 *bis* F rapportées au mètre devront être multipliées par $5\,000 \times 200\,000 \times 0{,}05$ ou par 50 000 000, pour exprimer en unités les moments correspondants.

Établissement, représentation graphique et limites d'emploi des diverses formules de transport. — Nous avons dit que le mode à employer pour transporter des déblais en remblai, varie nécessairement avec la distance à parcourir.

Les *fig.* 4 à 8 de la Pl. 18 donnent, pour des cas empruntés à diverses séries de prix, une représentation géométrique très-simple des dépenses afférentes à chaque mode particulier de transport, suivant les distances, et par cela même de la distance à laquelle il faut cesser d'en employer un pour passer à un autre. Les abscisses, dans ces cinq figures, représentent des distances comptées à partir de l'origine; les ordonnées représentent des prix croissant depuis zéro. Le prix de transport d'un mètre cube se com-

pose toujours d'une quantité constante b due au temps perdu par le véhicule et par son attelage pendant le chargement, augmentée d'une quantité proportionnelle au trajet parcouru x. Il a donc pour expression :

$$y = ax + b,$$

équation d'une ligne droite.

Pour la brouette, le chargement étant implicitement compté dans le prix du terrassement, la constante b est nulle ; aussi voit-on, sur les cinq figures, que les droites qui se rapportent à la brouette passent toutes par l'origine. Le prix croît avec la distance plus rapidement que par tout autre mode de transport ; mais les diverses administrations de chemins de fer n'ont pas admis la même vitesse d'accroissement.

Les valeurs qu'on attribue aux coefficients a et b pour les autres modes de transport varient aussi dans des limites assez étendues, et il serait intéressant de chercher les causes de ces différences, qui ne sont peut-être pas toutes parfaitement motivées. L'inspection seule et la comparaison des cinq figures font ressortir ces différences et mettent en évidence les distances à partir desquelles, dans chaque système, on passe d'un mode de transport à un autre. Ces distances sont les abscisses des points de rencontre de deux droites consécutives représentées par deux équations qui s'obtiennent en remplaçant, dans la précédente, a et b par les valeurs particulières relatives à chaque mode de transport.

Les *fig.* 7 et 8, construites d'après des séries en usage sur les travaux de la compagnie des chemins de fer du Nord, mettent en évidence l'emploi de la brouette jusqu'à $81^m,40$; sur la *fig.* 7, qui se rapporte à des déclivités longitudinales tout au plus égales à 0,006, le wagon à traction de chevaux vient se substituer au tombereau, à partir de $244^m,44$; et le wagon à traction de vapeur au wagon à traction de chevaux, à partir de 1 000 mètres.

Pour des déclivités supérieures à 0,006, les distances limites correspondantes sont 366^m,66 et 488^m,57 (*fig.* 8).

Nous résumons dans le tableau ci-après les données numériques relatives aux cinq figures 4 à 8, et les limites qui en résultent pour passer d'un mode de transport à un autre.

Dans ce tableau, *a* est le prix exprimé en fraction décimale du franc, du transport à 1 mètre de distance; *b* la constante, pareillement exprimée en fraction du franc, qui représente la valeur du temps perdu au chargement et au déchargement. La distance du transport *x* doit être aussi exprimée en mètres pour l'usage de la relation linéaire en *x* et *y*, donnée plus haut, dans laquelle, après les substitutions convenables, *y* sera le prix du transport en francs et fraction de franc.

Nous avons indiqué, pour chacun des modes de transport, la distance *d* à partir de laquelle il doit cesser pour être remplacé par le suivant.

Tableau des valeurs numériques servant à l'évaluation du prix de transport par divers modes.

	VALEURS de	VALEURS CORRESPONDANTES DE *a*, *b* ET *d* dans les cas figurés sur la Pl. 18.				
		Fig. 4.	*Fig.* 5.	*Fig.* 6.	*Fig.* 7.	*Fig.* 8.
Brouette	*a*	0^f,0066	0^f,0100	0^f,0100	0^f,0055	0^f,0055
	b	»	»	»	»	»
	d	70^m,20	33^m,33	33^m,33	81^m,40	81^m,40
Tombereau	*a*	0^f,0010	0^f,0	0^f,0010	0^f,0012	0^f,0012
	b	0 ,40	0 ,30	0 ,30	0 ,35	0 ,35
	d	300^m	166^m,66 125 ,00	333^m,33 250 ,00	244^m,44	366^m,66
Wagon à traction de chevaux.	*a*	0^f,0005	0^f,0004	0^f,0004	0^f,0003	0^f,0006
	b	0 ,55	0 ,40	0 ,50	0 ,57	0 ,57
	d	»	»	»	1.000^m	488^m,57
Wagon à traction à vapeur.	*a*	»	0^f,00020	0^f,00020	0^f,00015	0^f,00025
	b	»	0 ,40	0 ,50	0 ,72	0 ,72

On remarquera que sur les *fig.* 5 et 6, le point de dé-

part étant le même pour les droites relatives au wagon à traction de chevaux et au wagon à traction à vapeur, ou, en d'autres termes la valeur du coefficient b étant la même pour ces deux modes de transport sur chacune de ces figures, il n'y a pas, suivant la série des prix de la compagnie des chemins de fer de l'Ouest, avantage à substituer le wagon à traction de chevaux au tombereau, lorsque l'on dispose de wagons à traction de vapeur. Car l'emploi de la première espèce commencera seulement à 167 ou à 333 mètres, tandis que l'emploi de la seconde procure déjà économie sur le tombereau à 125 et à 250 mètres.

Le graphique met en évidence ce qui ressort du calcul.

POST-SCRIPTUM.

La préface du beau livre qui vient d'être publié sous le titre : *Leçons de statique graphique*, par ANTONIO FAVARO, professeur à l'Université de Padoue, traduite de l'italien par PAUL TERRIER, ingénieur des arts et manufactures (Paris, Gauthier-Villars, 1879), mentionne (p. XXIII), d'après Culmann, un procédé graphique de l'ingénieur bavarois Bruckner mort en 1847, pour la détermination des mouvements de terre.

Nous avons en effet trouvé dans le traité du célèbre professeur de Zurich (*Die graphische statik*, Zurich, 1875, p. 142 et suiv.), la description d'un procédé qui nous paraît identique au fond à celui que nous avions fait connaître dès 1840, dans l'article des *Annales* déjà cité ; et ce qui rend le rapprochement plus frappant, c'est que les ingénieurs suisses ont plus récemment, dit M. Culmann, employé le planimètre au procédé de M. Bruckner. Or, c'est par là même que nous avions commencé.

N° 43

RAPPORT

SUR

LA COMPARAISON FAITE PAR M. RICOUR,

Ingénieur en chef des ponts et chaussées,

DE DIVERSES MÉTHODES

EMPLOYÉES

POUR LA DÉTERMINATION DES AIRES DES PROFILS EN TRAVERS,

DES EMPRISES ET DES TALUS (*)

Lorsqu'on dresse un projet de tracé de route ou de chemin de fer et qu'on a arrêté le profil en long, on connaît, pour chaque profil en travers, la cote de déblai ou de remblai sur l'axe et les inclinaisons du terrain naturel.

Les profils en travers sont en général décomposés en deux parties qu'on examine séparément, l'une à droite, l'autre à gauche de l'axe du chemin de fer.

(*) La *Commission des Annales* a jugé que ce rapport qui lui a été fait par M. l'inspecteur général de Fourcy, sur un travail très-intéressant de M. l'ingénieur en chef Ricour, suffirait pour donner une idée très-nette de ce travail et des conclusions que l'auteur en a tirées. Depuis que la Commission a pris cette décision, l'Administration supérieure a adopté les conclusions favorables à l'emploi des tables graphiques, résultant d'une délibération du Conseil général des ponts et chaussées. Elle en a donc fait dresser de nouvelles plus complètes que celles de 1843, et qui sont destinées à abréger les calculs qu'exigent les nombreux projets des chemins de fer actuellement à l'étude. C'est en 1877 que M. Ricour avait calculé, fait autographier et employé, pour les calculs de ses projets, des tables dans le système de celles de 1843, qu'il jugeait avoir été « un peu trop oubliées ».

Il importe d'obtenir rapidement la largeur de l'emprise, la longueur du talus et l'aire de chaque demi-profil : l'emprise fait connaître la surface des terrains à acquérir ; la longueur du talus donne la surface des talus à régler ; enfin l'aire de la section transversale une fois connue, le cube des terrassements est promptement calculé.

Il faut compter en moyenne sur 50 à 60 demi-profils en travers par kilomètre.

Pour des calculs aussi nombreux, l'économie de temps est précieuse.

Parmi les méthodes qui ont été indiquées pour obtenir rapidement les éléments de ces calculs, on doit signaler en première ligne les tableaux anamorphiques adressés aux ingénieurs avec la circulaire du 2 septembre 1843 (*Annales*, Lois et ordonn., 1843, p. 676), tableaux dont l'usage et les principes sont exposés dans la circulaire et dans deux mémoires de M. l'inspecteur général Lalanne (*Annales*, 1er sem. 1846, p. 1, et 2e sem. 1850, p. 133).

D'un autre côté, par une circulaire du 23 mai 1873, en adressant des tables proposées par M. Woyciechowski, ancien élève externe de l'École des ponts et chaussées, pour le calcul de l'emprise et des surfaces de remblais et de déblais dans les profils en travers, le ministre invitait les ingénieurs à lui faire connaître leur appréciation sur le résultat que l'usage desdites tables pourrait donner au point de vue pratique.

M. Ricour répondait à cette invitation en faisant connaître les résultats comparatifs obtenus à l'aide de chacune de ces méthodes, en laissant de côté les cas exceptionnels qui peuvent se présenter, notamment quand chaque demi-profil n'est pas entièrement en déblai ou entièrement en remblai, ou quand la pente naturelle du terrain n'est pas uniforme dans l'étendue du demi-profil.

Pour adapter la méthode de M. Woyciechowski aux études dont il est chargé, M. Ricour a reconnu que ce qu'il y

aurait de mieux à faire consisterait à appliquer un gabarit en corne transparente, sur le couronnement et le talus de chaque profil en travers préalablement dessiné avec beaucoup de soin, et à lire directement sur le talus du gabarit la longueur de ce talus et la largeur de l'emprise qui s'y trouvent inscrits d'avance.

Quant à l'aire de chaque profil, elle a pour valeur une quantité qui peut se mettre sous la forme $S + p\Sigma$.

S et Σ, fonctions de la largeur de l'emprise, sont calculées d'avance par une table graduée de 0^m,05 et en 0^m,05 à partir de 3^m,05 (demi-largeur de la plate-forme), de telle sorte qu'après une interpolation facile, il suffit de multiplier Σ par la pente p du terrain du profil en travers et de faire l'addition de S et de $p\Sigma$.

L'autre méthode consiste à se servir des tableaux anamorphiques de M. Lalanne « *qui ont reçu,* » dit l'auteur de la note, « *de si nombreuses applications en France et à l'étranger* ».

Ces tableaux, dont la construction ne présente aucune différence essentielle avec ceux qui ont été adressés aux ingénieurs en 1843, ont été établis à nouveau par M. Ricour au nombre de quatre, pour le gabarit particulier sur lequel il opérait. Ils permettent de lire, sans aucun calcul, pour des hauteurs sur l'axe variant de 0 à 20 mètres et pour des pentes comprises entre 0 et 0^m,40 par mètre :

1° Les emprises et les talus en déblai ;

2° Les emprises et les talus en remblai ;

3° Les aires des profils en travers en déblai ;

4° Les aires des profils en travers en remblai.

M. Ricour fait d'ailleurs connaître que chaque collection de tableaux est revenu au prix modique de 0^f,62 ; que l'apprentissage de la lecture s'en fait en quelques heures et que l'usage en est des plus faciles.

Il résume ainsi la comparaison des deux méthodes :

« Dans la première, il faut superposer au profil dessiné

« un gabarit gradué. C'est une opération manuelle qui « exige beaucoup de soin. La lecture est influencée par « deux causes d'erreur : l'une tient à l'inexactitude inhé- « rente au dessin du profil et à la graduation du gabarit; « la deuxième, à la difficulté de faire exactement la su- « perposition.

« Dans la deuxième méthode, il n'y a aucune superpo- « sition à faire, et la lecture comporte le degré d'exacti- « tude du dessin lui-même; le retrait du papier n'a aucune « influence sur les résultats.

« Dans la première méthode, le calcul de l'aire exige « une recherche dans les tables numériques, une multipli- « cation et une addition ou une soustraction.

« Dans la deuxième, la valeur de l'aire se lit directe- « ment comme l'emprise et le talus.

« Dans la première, il faut environ quatre minutes pour « obtenir l'emprise, le talus et l'aire de chaque demi-profil « en travers. La différence entre les résultats obtenus et « les résultats calculés directement dépasse rarement « 2 p. 100.

« Dans la seconde, il ne faut que deux minutes pour « faire les trois lectures, et l'erreur dépasse rarement « 1 p. 100.

« *Conclusion.* — La deuxième méthode, comparée à la « première, offre donc le double avantage de l'exactitude « des résultats et de l'économie du temps. Nous sommes, « en conséquence, d'avis que pour les études de chemins « de fer, l'emploi des tables de M. Woyciechowski ne « constitue pas un progrès sur l'emploi des tableaux gra- « phiques construits d'après la méthode anamorphique de « M. l'inspecteur général Lalanne. »

Aux avantages que l'emploi des tableaux anamorphiques présente sur la méthode de M. Woyciechowski, il faut ajouter encore que, pour appliquer la première méthode,

il n'est pas nécessaire de dessiner les profils en travers. Une cote relevée à 10 mètres d'un côté et de l'autre, à partir de l'axe, permet d'évaluer immédiatement la pente transversale, et c'est, quand cette pente est uniforme, tout ce qu'on a besoin de connaître avec la hauteur sur l'axe pour se servir des tableaux anamorphiques.

Pour appliquer la seconde méthode, au contraire, il est toujours nécessaire de dessiner les profils ou tout au moins l'axe du demi-profil et le terrain naturel. Le temps employé à faire ce dessin doit encore être ajouté à celui que M. Ricour indique comme nécessaire pour le calcul de l'emprise, du talus et de l'aire. Cet ingénieur en chef n'évalue pas ce temps à moins de deux minutes et demie par demi-profil, de sorte que, dans le cas où la déclivité du terrain naturel, dans le sens transversal, est uniforme, on peut, avec les tables graphiques, opérer trois fois plus vite qu'en appliquant cette seconde méthode.

Il est donc hors de doute que dans tous les cas où il n'est pas nécessaire, pour des motifs étrangers aux calculs dont il s'agit, de dessiner les profils, l'emploi des tableaux anamorphiques procure à la fois l'économie du temps et des résultats plus exacts.

Quand la pente transversale des profils en travers n'est pas uniforme, il est certain que le procédé donné par M. Woyciechowski peut offrir des avantages. C'est pour ce cas seulement qu'il paraît avoir été recommandé par l'auteur, en dernier lieu, ainsi qu'il résulte de la note insérée aux *Annales* (2e sem., 1874, p. 192). Une fois que le demi-profil en travers a été dessiné, — et il doit l'être lorsque le terrain affecte la figure d'une ligne brisée, — quoique la lecture de la largeur d'emprise et de la longueur du talus sur le dessin lui-même, à l'aide d'un gabarit transparent, ne donne que des résultats souvent peu précis, l'approximation suffira aux besoins de la pratique. L'emploi du gabarit est alors un procédé assez expéditif et de même nature

que celui qui consisterait à mesurer directement les emprises et le talus sur le dessin à l'aide d'un double-décimètre. Mais il reste à déterminer la superficie, et l'auteur la déduit directement des données mêmes du carnet de nivellement combinées avec la largeur de l'emprise. La longueur des calculs résulte du nombre des brisures, et n'est nullement imputable, dans ce cas, au procédé.

Il serait intéressant, d'ailleurs, de faire des épreuves comparatives entre l'emploi de ce procédé et celui de la roulette Dupuit décrite aux *Annales* (2e sem., 1844, p. 122).

N° 44

PAROLES PRONONCÉES AUX FUNÉRAILLES

DE M. L'INSPECTEUR GÉNÉRAL

H.-C.-L. EMMERY DE SEPTFONTAINES,

le 28 juin 1879,

Par M. L. LALANNE, inspecteur général des ponts et chaussées.

Huit mois à peine se sont écoulés depuis que l'ingénieur éminent, dont la tombe vient de s'ouvrir, s'était séparé de nous dans la plénitude de ses facultés, nous promettant d'abréger autant qu'il le pourrait la durée de cette première séparation, et de revenir au printemps visiter cette École qu'il quittait avec douleur et non sans avoir longtemps hésité. Après 42 ans de services honorables dans le corps des ponts et chaussées, après 14 ans d'exercice dans les fonctions d'inspecteur de l'École, il ne pouvait se résoudre à rester complétement étranger à nos travaux ni à rien de ce qui touche notre Corps.

La mort en a autrement disposé; et, de notre camarade, de notre ami, nous ne revoyons plus qu'un cercueil!

Né le 2 décembre 1815, à Saint-Maur, dont le nom seul rappelle les beaux travaux qui ont occupé une partie notable de la carrière de son père, *Henri-Charles-Léopold* EMMERY DE SEPTFONTAINES sortait de l'École polytechnique pour entrer à l'École des ponts et chaussées le 1er décembre 1836. Attaché au service de la Seine en 1839, il ne cessa pendant 25 années consécutives, d'abord comme ingénieur ordinaire, ensuite comme ingénieur en chef, d'étudier les moyens d'améliorer cette voie navigable d'une si haute

importance, et d'exécuter des travaux considérables, que l'administration approuvait conformément à ses projets. En 1857, au moment où l'on venait d'assurer à la partie fluviale le tirant d'eau de 1^{m},60 que l'on considérait alors comme normal, il publia sous le titre de *Manuel de la navigation de la Seine*, un recueil des règlements concernant la pratique de la rivière, ouvrage d'un incontestable mérite, que l'on a pris plus tard, que l'on prendra plus d'une fois pour modèle, et dont l'idée lui avait été suggérée par le désir d'être utile « aux mariniers, qu'il voyait « ignorants à l'endroit des dispositions les plus essentielles « touchant à leurs propres intérêts »; par le désir aussi « d'ajouter quelque chose à la sécurité de la navigation ».

Excellente pensée, conforme d'ailleurs aux traditions du Corps comme à l'exemple paternel : chercher à rendre service aux travailleurs de toute condition en prenant l'initiative au delà même des limites du devoir accompli !

Sa participation aux travaux de la Seine maritime ne fut pas moins grande et moins efficace que sur la partie fluviale. En collaboration avec d'autres ingénieurs distingués, il a contribué à ces endiguements célèbres qui, commencés par MM. Doyat et Beaulieu, et réalisés en une dizaine d'années, ont amélioré dans des proportions inespérées les conditions nautiques du port de Rouen.

Cette longue période passée sur diverses sections de la Seine eut un instant d'interruption tout à l'honneur d'Emmery. Aux premières élections qui suivirent la révolution de 1848, il fut appelé par 82.000 suffrages à siéger dans les rangs de l'Assemblée nationale comme représentant du peuple pour le Pas-de-Calais. Notre intention n'est pas de nous livrer ici à aucune appréciation politique : il suffira de dire qu'Emmery a su conquérir l'estime de tous ceux qu'avaient rapprochés de lui l'honneur de siéger à la Constituante, et qu'il y a laissé une trace durable dont il nous sera permis de parler avec l'assentiment de tous.

Secrétaire du comité des travaux publics, membre de la commission chargée d'examiner le projet de loi relatif à l'admission des conducteurs dans le corps des ponts et chaussées, il fut tout favorable à cette mesure que commandait l'équité et que justifiaient les services distingués d'un si grand nombre de sujets d'élite appartenant à la corporation de ces bons et modestes collaborateurs. Grâce à cette ouverture d'une barrière infranchissable jusque-là, leur attachement aux saines traditions de l'administration des travaux publics n'a fait que s'accroître, et on peut être assuré qu'ils se considèrent comme intéressés au même titre que nous au maintien de ces traditions.

La fin de la carrière parcourue par notre camarade n'a pas démenti cette longue série de travaux et d'actes utiles. Le poste d'Inspecteur de l'École des ponts et chaussées étant devenu vacant, M. Avril, alors Directeur de l'École, le désigna au choix du ministre, donnant en cela la preuve d'une sagacité bien connue, car il devinait des aptitudes qui ne s'étaient pas encore révélées. Nommé le 21 juillet 1864, Emmery n'a résigné ses fonctions qu'après 14 années d'une gestion qui, justement appréciée de tous ceux qui ont eu le bonheur de l'avoir pour collaborateur, ne sera pas la phase la moins honorable de sa belle carrière.

On doit se borner à rappeler ici quelques-uns des témoignages qu'il a reçus au moment où, désireux de se réfugier dans un repos qu'il avait bien gagné, et dont il devait hélas! si peu jouir, il venait de faire connaître sa résolution. « Il laisse en nous quittant », disait le président du Conseil général des ponts et chaussées (M. l'Inspecteur général Lefort), « des souvenirs dignes en tous points de « ceux qu'avait laissés son père ». S'associant à cette pensée, le Conseil la complétait dans sa séance du 10 octobre dernier.

« Dévoué sans partage », dit le procès-verbal de cette séance, « à ses délicates fonctions d'Inspecteur, M. Emmery

« ne se borna pas à communiquer à tous ceux qui l'en-
« touraient son zèle consciencieux et convaincu ; il ne se
« borna pas à surveiller avec une incessante sollicitude les
« études et la discipline intérieure dans cette pépinière du
« Corps des ponts et chaussées : il s'attachait encore à
« compléter au besoin l'éducation des élèves, à développer
« en toute occasion chez eux l'idée du devoir sous toutes
« ses formes et le souci de la dignité morale. Comment le
« Corps ne lui serait-il pas reconnaissant de ce labeur quo-
« tidien, et le plus souvent obscur, dans lequel il ne crut
« pas amoindrir sa personnalité ? »

Même après un témoignage collectif d'une si haute valeur, qu'il me soit permis, comme expression d'un douloureux et suprême adieu, de rappeler dans quels termes le Directeur de l'École rendait compte au Conseil de cette École des regrets qu'inspirait le départ d'Emmery.

« Nul », disait-il, « ne le regrettera plus que moi, qui
« ai trouvé en lui un collaborateur infatigable et qui ai
« profité, chaque jour, depuis quinze mois, de la connais-
« sance approfondie qu'il possède des traditions et des
« antécédents, de la fermeté et de la droiture de ses appré-
« ciations sur toutes choses. Les liens d'une amitié déjà
« vieille ont été singulièrement resserrés par cette collabo-
« ration de tous les jours, de tous les instants ; trop courte,
« malheureusement, et pendant le cours de laquelle il ne
« s'est pas élevé un seul dissentiment. Les regrets que
« j'exprime ainsi pour mon propre compte sont partagés
« par tout le personnel de l'École. Les membres du corps
« enseignant, les élèves des nombreuses promotions qui ont
« passé par l'École depuis 1864, les fonctionnaires et em-
« ployés du service intérieur savent que l'aménité des
« formes, que le sentiment de paternité pour la jeunesse,
« que la bienveillance pour les situations dignes d'intérêt
« dominaient dans tous ses actes, alors même qu'il tenait
« la main à l'exécution des règlements confiés à sa garde.

« C'est à l'ensemble de ces qualités éminentes autant « qu'à une longue et belle carrière que le Conseil général « des ponts et chaussées a rendu pleine justice, en consi- « gnant au procès-verbal d'une de ses dernières séances « l'assurance des regrets unanimes que M. Emmery em- « porte dans sa retraite, où le suivront aussi l'affection et « la haute estime de tous. »

Ces regrets, cher Emmery, sont aujourd'hui bien amers! Encore une fois, adieu!

N° 45

NOTE

SUR

LES RAPPORTS DE L'ÉTAT

AVEC

LES COMPAGNIES DE CHEMINS DE FER EN ANGLETERRE.

Par M. G. CAVAIGNAC, ingénieur des ponts et chaussées.

Si l'on voulait envisager d'une façon générale les rapports de l'État avec les compagnies de chemins de fer, il faudrait passer en revue toutes les différentes circonstances qui marquent les périodes de l'existence légale des compagnies. L'État est intéressé, en effet, à entourer des garanties indispensables la constitution de la société, la construction de la ligne, son exploitation technique et commerciale; mais la question envisagée ainsi est loin de présenter dans toutes ses parties un intérêt uniforme. La plupart du temps, en effet, les compagnies sont les premières intéressées à satisfaire le public, et l'intervention de l'État est alors inutile. Il est, au contraire, des questions spéciales, sur lesquelles l'État a constamment l'occasion et le devoir de faire entendre la voix de l'intérêt public qui risquerait sans cela d'être sacrifié à l'intérêt de groupes individuels.

Pour remonter à l'origine, on pourrait presque dire que l'État est appelé à exercer son action sur les compagnies, avant même qu'elles n'existent, pour amener leur constitution. C'est en effet un de ses devoirs les plus impérieux d'activer le développement du réseau national,

soit en assurant aux compagnies certains avantages, soit en entreprenant lui-même la construction de nouvelles lignes. C'est de ce côté que sont en ce moment tournées toutes les préoccupations en France. En Angleterre, cette difficulté ne s'est pas présentée. Soit que les Anglais aient davantage le génie des entreprises hardies, soit que le pays, plutôt industriel qu'agricole, et riche par son sous-sol, même dans les parties les plus infertiles, se soit mieux prêté, par une plus grande concentration de richesses, au développement des chemins de fer, les pouvoirs publics n'ont jamais eu à prendre en main, soit directement, soit indirectement, l'extension du réseau.

En ce qui concerne la surveillance financière des chemins de fer, la répression de la spéculation, les Anglais ont au contraire été moins heureux que nous. Les lois restrictives par lesquelles ils ont cherché à entourer des garanties nécessaires la constitution des sociétés financières n'ont pas été seulement insuffisantes; elles ont été, en ce qui concerne spécialement la limitation du capital obligations par rapport au capital actions, comme non-avenues. Il faut reconnaître d'ailleurs que l'intérêt de cette question n'est plus très-actuel. Les lignes qui restent à construire n'ont plus assez d'importance pour alimenter la spéculation, et il est permis de croire que la crise qu'elle a produite, il y a peu d'années, sera la dernière, en ce qui concerne du moins la construction des lignes de chemins de fer.

Les garanties dont on a jugé utile d'entourer, au point de vue technique, la construction des lignes de chemins de fer ou leur exploitation, n'appellent pas d'observations. Le contrôle de l'État ne laisse d'ailleurs rien à désirer en ce qui concerne la construction, ni en France, ni en Angleterre. Quant à l'exploitation, l'Angleterre se plaint avec raison du nombre des accidents, bien plus considérable sur ses lignes que sur les nôtres. Ceci se rattache dans une certaine mesure au défaut de surveillance, et

surtout au défaut de centralisation dont nous parlerons plus loin.

Restent enfin toutes les questions que soulève l'exploitation commerciale des voies ferrées. C'est ici que la surveillance de l'État doit s'exercer dans les conditions les plus complexes, les plus délicates, et qu'elle est, par suite, le plus difficile à organiser. C'est aussi sur ce point que nous avons l'intention d'insister.

On sait que les principes de liberté et de concurrence ont, dès le début, dominé la législation des chemins de fer en Angleterre. Non-seulement les concessions étaient perpétuelles, non-seulement l'État traitait presque l'industrie des chemins de fer comme toute autre industrie privée, ne leur accordant ni subventions directes ni subventions indirectes, imposant à peine un maximum aux tarifs (maximum illusoire, nous le verrons bientôt) ; non-seulement il livrait les principales artères du réseau à une série de petites compagnies se faisant suite les unes aux autres ; non-seulement il autorisait la construction de lignes concurrentielles d'un point à un autre ; mais il allait encore jusqu'à considérer le chemin de fer comme une grande route ouverte à tout le monde, et sur laquelle le constructeur n'avait pas un droit exclusif de circulation. C'était là une utopie, et quoique la loi conserve encore dans ses termes la trace manifeste de cette conception erronée du rôle des chemins de fer, il a bien fallu reconnaître qu'un pareil système était en fait absolument impraticable. L'Angleterre a même dû reconnaître que la concurrence entre les compagnies de chemins de fer ne pouvait subsister, car, en 1858, une réunion des représentants des principales compagnies prit une série de résolutions qui impliquaient en théorie l'abandon du principe de la concurrence. Cet abandon fut réalisé en fait par des traités d'exploitations, des fusions, etc. Toutefois, il ne serait pas

juste de conclure de là que l'Angleterre se trouve aujourd'hui dans la même situation qu'un État qui aurait dès le début appliqué aux chemins de fer le principe du monopole. Il ne dépendait en effet de personne d'effacer les conséquences d'un état de choses qui avait duré plus de trente-cinq ans ; et lorsque l'État a voulu plus tard intervenir, il a trouvé, ainsi que nous allons le voir, même après 1858, dans le nombre et l'enchevêtrement des compagnies, dans la diversité de leurs intérêts, mainte occasion de faire sentir son action.

Reprenons à grands traits l'historique de la législation anglaise en ce qui concerne l'exploitation des chemins de fer (*).

Au début, la réglementation est réduite à sa plus simple expression. La loi qui autorise l'établissement d'une compagnie fixe en même temps le maximum des tarifs qu'elle est autorisée à imposer. Le maximum est établi une fois pour toutes, et l'État ne peut le modifier.

Bientôt (en 1844) on sent l'inconvénient d'un pareil état de choses. Une nouvelle loi décide que pour les lignes qui seront construites à l'avenir, les tarifs pourront être révisés après 21 ans, à condition que les bénéfices s'élèvent à plus de 10 p. 100 du capital engagé. En même temps se manifeste la préoccupation de sauvegarder l'intérêt public contre la toute-puissance des compagnies. La loi de 1845 oblige les compagnies à publier leurs tarifs et à n'imposer que des taxes raisonnables. Mais cette dernière disposition, trop vague, trop étendue, reste lettre morte et n'est point appliquée. Enfin un principe est posé par la même loi,

---

(*) Tous les faits résumés dans cet historique jusqu'en 1873 et connus depuis plusieurs années par le livre de M. de Franqueville sont longuement exposés dans le livre anglais de Hodges (*Hodges on Railways*, sixth edition by J. M. Lely, nov. 1876, H. Sweet, London), chapitres x, xi et xii.

c'est que des charges égales doivent être imposées à tous, dans des circonstances semblables.

Bien des inconvénients subsistaient encore : en premier lieu, l'excessive variété des tarifs maximums et même la variété dans la classification des tarifs; car chaque fois qu'une compagnie se présentait au Parlement, la Commission chargée d'instruire sa demande adoptait une nouvelle classification (*).

De plus, les tarifs maximums étaient illusoires; car l'État, s'il limitait le tarif lui-même, ne limitait pas toutes les charges accessoires (*terminal-charges*) pour chargement, déchargement, etc., et les compagnies, en amplifiant outre mesure ces charges, se jouaient des maximums imposés par l'État.

Enfin, en dehors de ces inconvénients spéciaux, on ne tarda pas à reconnaître que d'une façon générale l'intérêt public n'était pas assez protégé. Il ne suffit pas, en effet, qu'une disposition soit édictée pour qu'elle soit exécutée, dans un pays surtout aussi éloigné de la centralisation que l'est l'Angleterre. Mais au lieu de chercher le remède où il était possible de le trouver, on crut le rencontrer dans une nouvelle modification de la législation.

La loi de 1854, voulant sauvegarder, plus qu'on ne l'avait fait jusqu'alors, l'intérêt du public, résuma toutes les garanties qui étaient jugées désirables, dans une clause qui constitue pour ainsi dire la loi à elle seule : clause extrêmement compréhensive, très-vague encore, dont l'application fut confiée à la magistrature, à la cour des « *Com-*

(*) Des mesures ont été prises à cet égard ; on a remédié incomplétement à cet inconvénient par le renvoi de toutes les demandes des compagnies à une Commission parlementaire unique. On a vu d'ailleurs les compagnies, obligées dans leurs rapports entre elles d'adopter des bases communes, faire ce que l'État s'était refusé à accomplir ; elles ont établi une *clearing house* pour la liquidation de leurs comptes ; et le premier soin de cette chambre de liquidation a été d'adopter une classification des tarifs uniforme,

mon Pleas ». Elle prescrivait aux chemins de fer : 1° de fournir toutes les facilités raisonnables aux expéditeurs; 2° de fournir les mêmes facilités au trafic en transit sur leurs lignes; 3° de ne pas créer de préférences injustes. Tels étaient les trois points saillants.

On peut dire que cet acte resta lettre morte pendant les vingt années où il fut placé dans la juridiction de la cour des « *Common Pleas.* » Nous reviendrons plus loin sur la façon dont il fut appliqué, lorsque nous ferons ressortir l'immense amélioration qui résulta, sans changement sensible dans la législation, du seul fait d'un transfert de juridiction de la cour des « *Common Pleas* » à la commission des chemins de fer.

Mais avant d'aborder ce dernier et décisif changement, voyons quels étaient en 1872 les sauvegardes de l'intérêt public, les moyens d'action de l'État sur les compagnies de chemins de fer.

En premier lieu, un contrôle était exercé par le Parlement. Les compagnies ont constamment à demander des autorisations aux Chambres, même pour des modifications de peu d'importance. Les commissions de la Chambre des communes peuvent, lorsque la compagnie a donné de graves sujets de mécontentement, refuser les autorisations demandées; mais tout le monde voit ce qu'une pareille sanction a d'insuffisant. Si une compagnie élève trop ses tarifs, ou favorise certains industriels aux dépens de leurs concurrents, c'est un fort mauvais remède que d'empêcher cette compagnie de construire une nouvelle ligne ou d'agrandir une station. Cette sanction a de plus le tort très-grave de ne pouvoir s'exercer que d'une manière indirecte et d'une façon intermittente. Il dépend en effet, dans une certaine mesure, de la compagnie, de choisir le moment où elle viendra s'y soumettre. De plus, elle n'est applicable que si un contrôle sérieusement organisé vient signaler au Parlement les fautes des compagnies.

Ce contrôle administratif existe. Le « *Board of Trade* » (ou ministère du commerce) dispose d'un certain nombre d'inspecteurs qu'il envoie de temps à autre surveiller les lignes de chemins de fer et examiner la façon dont elles se conforment aux règlements en vigueur. Mais les inspecteurs sont au nombre de quatre seulement, et l'insuffisance de cette organisation est bientôt devenue manifeste. On a dû reconnaître que les règlements étaient inobservés partout où les compagnies avaient un intérêt à ne pas s'y soumettre, et que l'État était impuissant à en assurer l'exécution. Le pouvoir effectif des inspecteurs du « *Board of Trade* » se bornait en effet à signaler à l'administration les fautes relevées par eux, et l'on pensait que dans les cas de résistance, la menace d'une publication de leur rapport suffirait à intimider une compagnie récalcitrante et à la faire rentrer dans les voies de la soumission.

L'on voit combien étaient incomplets à la fois, et la surveillance effective, et l'arsenal des mesures respectives.

La cour des « *Common Pleas* » avait bien pour l'application de l'acte de 1854 des pouvoirs assez étendus; mais ces pouvoirs, nous allons le montrer, elle ne les exerçait pas.

Les mesures prises par l'acte de 1854 peuvent, nous l'avons dit, se classer sous trois chefs :

1° Les compagnies doivent accorder aux expéditeurs toutes les facilités raisonnables.

2° Elles doivent au trafic en transit sur leurs lignes les mêmes facilités.

3° Elles ne doivent pas accorder à quelques-uns de leurs clients de préférences injustes.

L'esprit est tout d'abord frappé du vague de ces dispositions. En France, le danger eût été sans doute, que ce vague ne prêtât à l'arbitraire. En Angleterre, il a conduit à l'inertie. Des magistrats habitués à interpréter des lois très précises dans leurs textes devaient hésiter devant l'application des dispositions de ce genre, où tout,

pour ainsi dire, était affaire d'appréciation. De plus, ils manquaient de notions techniques dans des matières où une connaissance approfondie de tout ce qui touche au trafic des voies ferrées était nécessaire. La suite a prouvé que c'était en grande partie à ces motifs qu'il fallait attribuer le peu d'effet de l'acte de 1854.

La Cour n'eut à juger en 20 ans que 34 affaires; encore, sur ces 34 affaires, 15 rentrent-elles dans une catégorie tout à fait spéciale. Elles ont pour objet des difficultés suscitées par la prétention qu'avaient émise les compagnies d'accaparer le camionnage de leurs marchandises, au départ et à l'arrivée. Sauf ces procès entre compagnies de chemins de fer et entrepreneurs de transports, la Cour n'eut à juger qu'un nombre d'affaires insignifiant. Le second paragraphe de la loi de 1854, celui qui impose aux compagnies l'obligation d'accorder des facilités raisonnables au trafic de transit, ne fut appliqué qu'une seule fois dans ces 20 années.

Lorsqu'on parcourt la série des jugements rendus par la Cour, on est frappé des hésitations auxquelles elle paraît être en proie, du défaut de fixité dans la jurisprudence, et l'on est obligé de reconnaître que les décisions rendues aboutissent à favoriser le monopole plutôt qu'à lui imposer des limites.

En 1873, le Parlement fit un nouveau pas en avant, et tout en insérant quelques nouvelles dispositions dans l'acte de 1873, il s'efforça surtout d'assurer d'une façon plus certaine l'observation des dispositions déjà votées. Il pensa y arriver par la création d'un nouveau tribunal : la Commission des chemins de fer. Nous verrons que cette fois la tentative fut plus heureuse. La décision prise en 1858 par les principales compagnies, et qui mettait fin au régime de la libre concurrence, rendait d'ailleurs, en aggravant les maux du monopole, une solution plus nécessaire.

Nous allons dire en quelques mots quelles sont les attributions et la constitution de la Commission des chemins de fer, pour arriver ensuite à exposer en détail sa doctrine, sa jurisprudence, et les résultats auxquels elle est arrivée en ce qui concerne l'action à exercer par l'État sur les compagnies.

La Commission des chemins de fer participe à la fois du caractère judiciaire et du caractère administratif. Elle se compose de trois membres, dont un doit être un légiste et un autre un homme versé dans les questions techniques. — Quant aux attributions, elles peuvent se résumer ainsi :

Ce sont en premier lieu (sauf une différence importante en ce qui concerne le trafic de transit) celles que l'acte de 1854 conférait à la cour des « *Common Pleas* ». — Tel est leur texte à peu près littéral :

1° La Commission peut enjoindre aux compagnies de chemins de fer : de donner au public toutes les facilités raisonnables, pour la réception, le transport et la remise des marchandises ;

2° De s'abstenir d'accorder aucune préférence déraisonnable à aucune personne ou compagnie.

3° Elle peut enjoindre à toute compagnie faisant partie d'une voie de communication continue, de donner au public toutes les facilités raisonnables, pour la réception et le transport du trafic provenant des lignes auxquelles elle se rattache, ou en destination de ces lignes (trafic de transit).

L'acte de 1873 complète l'acte de 1854, en stipulant que ces facilités raisonnables comprendront l'obligation de tarifs communs.

Nous ferons remarquer que les compagnies intéressées ont seules le droit de demander à la Commission l'application de la première et de la dernière de ces dispositions, et que le public n'est point admis à en poursuivre devant elle l'exécution.

D'autres attributions sont encore conférées à la Commission des chemins de fer.

Ainsi aucune convention d'exploitation ne peut entrer en vigueur sans avoir été approuvée par la Commission, qui a de plus le droit de la réviser tous les dix ans.

Aucune convention donnant à une compagnie de chemins de fer un pouvoir quelconque sur un canal, ne peut entrer en vigueur sans être approuvée par la Commission ; celle-ci doit, de plus, veiller à l'exécution d'un article de la loi qui oblige les compagnies de chemins de fer à entretenir en bon état les portions de canaux qu'elles exploitent.

La Commission doit surveiller également l'exploitation par les compagnies de chemins de fer, des bateaux à vapeur.

Elle doit obliger les compagnies à publier leurs tarifs, obligation dont le « *Board of Trade* » a été impuissant à assurer l'exécution.

Elle peut obliger les compagnies à distinguer dans leurs tarifs ce qui est afférent aux « *terminal charges* », et ramener ces « *terminal charges* » à un taux raisonnable.

Toutes les questions qui sous l'empire de la législation antérieure devaient être tranchées par arbitrage, peuvent, à la demande de l'une des compagnies intéressées, être décidées par la Commission.

Tout différend où l'une des parties est une compagnie des chemins de fer, peut d'un commun accord, lui être déféré.

Ce simple résumé suffit à montrer que les attributions de la Commission des chemins de fer sont des plus étendues, en ce qui concerne les tarifs, d'une part, et les rapports des compagnies entre elles, de l'autre. Mais les termes un peu vagues de ces dispositions ne donnent pas une idée exacte des pouvoirs qu'exerce la Commission, dans la réalité.

Avant d'entrer dans un examen détaillé des décisions rendues dont nous verrons plus loin l'importance et la variété, une simple énumération permettra de constater quel progrès a été réalisé par le simple transfert de juridiction (*).

Affaires jugées pendant 5 années par la Commission de chemins de fer, y compris celles qui ont donné lieu à des transactions au cours de l'instance.

NATURE DES AFFAIRES.	1874	1875	1876	1877	1878
Obligations d'accorder toutes facilités pour la réception, le transport et la remise des marchandises. . .	1	2	1	3	7
Défense d'accorder à qui que ce soit d'injustes préférences.	3	9	9	1	1
Obligation d'accorder toutes facilités raisonnables au trafic de transit. — Obligation de tarifs communs. .	2	3	2	3	2
Affaires qui, sous l'empire de la législation antérieure à 1873, eussent dû être tranchées par l'arbitrage, et qui ont été soumises par l'une des parties à la Commission.	2	9	12	5	7
Arbitrages déférés d'un commun accord à la Commission, l'une des deux parties étant une compagnie de chemins de fer.	1	2	2	»	»
Conventions d'exploitation.	6	5	6	5	5
Distinction des « *terminal charges* » et fixation de leur montant.	»	2	2	»	»
Affaires concernant le service des postes.	»	1	»	»	»
Publication des tarifs.	1	2	»	»	»
Affaires relatives aux canaux.	»	»	»	3	»
Totaux.	16	35	34	20	22

L'on voit déjà combien nous sommes loin (à n'examiner que le nombre des affaires) des jugements rendus par la cour des « *Common Pleas* », qui en 20 ans se sont élevés à 34 seulement; et parmi les décisions rendues, il en est bien peu qui ne portent sur des affaires de la plus haute importance. Quelques-unes affectent les intérêts de districts miniers tout entiers, en leur ouvrant par des réductions de tarifs des voies nouvelles; d'autres tendent à établir l'égalité de traitement entre les brasseries de « *Burton upon*

(*) Les renseignements qui suivent proviennent des cinq premiers rapports annuels présentés au Parlement par les membres de la commission (*Parliamentary Papers* 1875, 1876, 1877, 1878, 1879).

Trent », industries d'une importance exceptionnelle ; d'autres facilitent l'établissement de communications rapides entre Londres et le nord de l'Écosse ; d'autres réglementent d'une façon générale les tarifs entre les stations communes à deux des plus grandes compagnies. D'ailleurs, il serait impossible de se faire une idée de l'extension des pouvoirs de la Commission, si nous n'entrions dans le détail de quelques-unes des décisions rendues.

La clause connue sous le nom de : clause d'injuste préférence, ne présente rien de très-particulier ; elle existe en France comme en Angleterre ; elle peut être plus ou moins strictement appliquée, mais elle ne représente que l'intervention de l'État en faveur d'un intérêt supérieur de justice, et n'offre comme limitation du droit des compagnies rien d'exceptionnel.

La Commission n'a pas été plus loin dans l'application de cette clause que ne va la législation française. Elle ne l'a pas considérée comme contraire à l'établissement de tarifs différentiels (*) ; mais elle n'a pas admis que des réductions de tarifs fussent accordées à un expéditeur qui s'engageait à ne se servir que du chemin de fer ; ou en d'autres termes, elle a repoussé les tarifs d'abonnements (**). D'autre part, elle a admis qu'une compagnie pourrait légitimement accorder des réductions de tarifs à qui s'engageait à fournir par an un tonnage minimum, pourvu toutefois que les mêmes conditions fussent offertes à tous ceux qui étaient en état de prendre un pareil engagement, et que la compagnie se trouvât en concurrence avec d'autres lignes (***).

(*) Les tarifs différentiels n'ont jamais été mis directement en question ; mais il résulte de différentes décisions qu'ils sont admis sans contestation (2e rapport, page 2. Foreman and others. v. Great Eastern RC°).

(**) 3e rapport, § 6. Elle admet les tarifs d'abonnement résultant de conventions antérieures, mais les exclut pour l'avenir.

(***) 3e rapport, § 7.

Mais où la Commission a exercé envers les compagnies une surveillance des plus rigoureuses, c'est dans l'application de ce que les Anglais appellent la clause de « *defficient accommodation* » ; en d'autres termes, des deux articles de la loi de 1873, qui obligent à accorder toutes les facilités raisonnables : 1° pour la réception, le transport et la remise des marchandises ; 2° pour le trafic de transit. Cette clause, par le vague même de ses termes, était destinée à n'avoir d'efficacité que celle que lui prêterait la jurisprudence du tribunal chargé de l'appliquer, et, par suite, la confiance que les parties lésées auraient dans la fermeté de ce tribunal. On a vu qu'elle est restée lettre morte entre les mains de la cour des « *Common Pleas* »; on va voir ce qu'elle est devenue entre celles de la Commission des chemins de fer. En voici quelques exemples.

La Commission a contraint en maintes circonstances les compagnies à construire de nouvelles stations sur certains points, ou à agrandir les stations existantes (*).

Deux compagnies avaient dans une même ville deux stations, distantes de 2 kilomètres environ, et reliées par une voie sur laquelle elles ne s'étaient point entendues pour faire circuler leurs trains. La Commission les a contraintes à rétablir la communication. Il est en France tel cas identique où l'État reste impuissant (**).

Une compagnie qui avait des tarifs différents pour deux espèces diverses de charbons, se faisant concurrence à certains égards et connues sous le nom « *Splint Coal* » et « *Cannel Coal* », est contrainte à ramener ces deux tarifs à un chiffre uniforme (***).

Deux voies sont ouvertes pour le transport du charbon, d'un point à un autre. L'une de ces deux voies appartient tout entière à une compagnie, l'autre partiellement seu-

(*) 5e rapport, §§ 8, 9, 10.
(**) 4e rapport, § 10.
(***) 2e rapport, page 1.

lement. Il est interdit à la compagnie d'appliquer deux échelles de tarifs différentes sur ces deux voies (*).

Une compagnie est obligée d'indiquer la part de son tarif afférente aux « *terminal charges* » ; en réduisant cette part de 3 francs à 0f,60, la Commission l'empêche de rendre illusoire le maximum imposé (**).

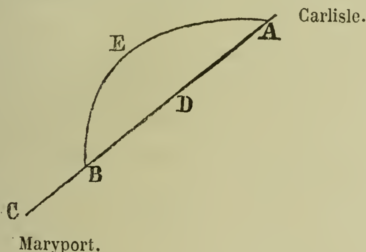
Deux voies différentes sont ouvertes à un même trafic. La Commission détermine les tarifs, et, au lieu de laisser les compagnies libres de s'entendre et de lutter, établit un tarif kilométrique égal sur ces deux voies (***). Ce cas s'est présenté à plusieurs reprises.

(*) 1er rapport, page 5. East and West Junction R. C°. v. G. W. R. C°. — Voir aussi Hodges, page 520.

(**) 3e rapport, § 30.

(***) Ce cas est un de ceux où l'intervention a été poussée le plus loin ; il n'est pas inutile de dire dans quelles conditions la décision a été rendue.

La Cie AEB demandait à la Commission d'imposer à la Cie ADBC



l'obligation de lui accorder un tarif commun pour le transport du coke de Carlisle à Maryport. Les deux compagnies avaient pris l'engagement d'adopter des tarifs communs pour le trafic qu'elles échangeraient ; mais la Cie ADBC prétendait que la convention ne s'appliquait pas au trafic que les deux Cies se disputaient.

Le pouvoir de la Commission était absolu dans l'espèce, car la Cie AEB avait déféré l'affaire comme une de celles qui avant 1873 eussent dû être tranchées par arbitrage, et non comme une application du paragraphe de la loi de 1873 relatif aux tarifs communs (voir la note 4 de la page suivante).

La Commission décida que la Cie ADBC devrait accorder le tarif commun ; mais elle établit un tarif supérieur à celui qui existait sur la ligne directe, de façon que les deux tarifs fussent proportionnels aux longueurs kilométriques (5e rapport, § 19).

La Commission, en maintes circonstances, détermine le montant obligatoire d'un tarif commun, et en fixe la répartition entre deux compagnies (*).

Une compagnie est contrainte à entretenir et à exploiter un tronçon de canal qu'elle avait affermé afin d'interrompre la navigation sur cette voie (**).

Une compagnie ayant, par une amélioration de son système d'exploitation, gagné quelques minutes sur un long trajet, la compagnie qui lui fait suite est contrainte d'avancer d'autant le départ de ses trains, même aux dépens des correspondances établies sur ses propres lignes (***).

Ces quelques décisions suffisent à établir les points suivants : la Commission peut imposer à deux compagnies des tarifs communs, en fixer le montant (****), et les répartir entre les deux compagnies; elle peut, lorsqu'il s'agit de tarifs communs, imposer à une compagnie un tarif même inférieur au maximum qui lui est fixé par son cahier des charges ; elle est, toutes les fois qu'il n'y a pas de maximum, maîtresse absolue du tarif (ce cas se présente parfois, notamment pour les colis d'un poids inférieur à une limite variable suivant les compagnies) (*****); elle peut même déterminer le nombre et les heures de départ des trains ; elle peut contraindre à créer et à agrandir des stations.

Tous ces pouvoirs, que l'État ne possède ou n'exerce pas en France, existent réellement en Angleterre, ainsi que le prouvent les décisions rendues par la Commission.

Le pouvoir presque discrétionnaire qui résulte du vague des termes de la loi est en réalité limité par la qualité des

---

(*) 3e rapport, § 12; 4e rapport, § 15; 5e rapport, § 16, etc.

(**) 4e rapport, § 28.

(***) 3e rapport, § 25.

(****) Le pouvoir de la Commission en ce qui concerne le montant du tarif commun n'est pas absolu; elle ne peut qu'accorder ou refuser le tarif commun demandé par la Compagnie plaignante; elle n'a pas le *droit d'amendement.*

(*****) 4e rapport, § 14.

parties autorisées à introduire une plainte devant le nouveau tribunal, et par l'impossibilité où se trouve, dans certains cas, ce tribunal d'accorder *ultrà* ou *infrà petita*. C'est aussi de ce côté que les commissaires ont demandé l'extension de leurs attributions.

Il nous reste à parler des pouvoirs donnés à la Commission pour trancher par voie d'arbitrage les différends entre compagnies, notamment ceux qui, sous l'empire de la législation antérieure à 1873, eussent donné lieu à des arbitrages; c'est-à dire du pouvoir également discrétionnaire qui lui est accordé pour régler les rapports des compagnies entre elles. Quelques-unes des décisions que nous avons citées touchent d'ailleurs à ces questions. En voici quelques autres.

Deux compagnies se sont engagées à avoir les mêmes tarifs entre les stations communes à leurs deux réseaux. L'une des deux compagnies réduit ses tarifs par une mesure d'ensemble; la seconde sera-t-elle obligée de les réduire également? La Commission se livre à une étude des tarifs, les réduit dans certains cas, refuse de les réduire dans d'autres (*).

Deux compagnies se sont engagées à ne pas construire de nouvelles lignes et à ne pas en interdire à d'autres la construction en dehors du district propre à chacune d'elles. Mais il existe une région commune aux deux compagnies, par suite de l'impossibilité de déterminer les limites exactes du district propre à chacune. La commission, en accordant aux deux compagnies le droit de construire de nouvelles lignes dans cette région commune, facilite l'extension du réseau (**).

Une compagnie s'est donnée en location à une autre et s'est engagée à faire les travaux nécessaires. La commis-

---

(*) 2e rapport, page 4, Midland R. Co. v. Great Western R. Co.
(**) 3e rapport, § 17.

sion décide que *nécessaires* ne signifiera pas *indispensables*, mais bien *utiles*, pour donner au public toute satisfaction (*).

Nous rappellerons enfin l'exemple cité plus haut : une compagnie obligée d'avancer l'heure de ses trains.

Nous bornerons là ces citations; car la nature des affaires soumises à titre d'arbitrages à la commission des chemins de fer présente nécessairement une grande variété, et nous croyons avoir montré que la préoccupation dominante (**) de la commission a été toujours et partout, dans les affaires qui n'avaient trait qu'aux rapports entre compagnies comme dans celles qui avaient pour but immédiat de faire donner satisfaction au public, a toujours été, disons-nous, l'intérêt général. Presque tous les différends entre compagnies, tranchés par la commission, ont abouti, en somme, à une amélioration dont a bénéficié le public.

Ce que nous avons dit suffit, croyons-nous, à établir la nouveauté, l'importance des attributions de la Commission, et le plein succès qu'a eu sa création. Ce sujet suggère tout d'abord quelques réflexions.

Depuis longtemps les Anglais sont frappés des inconvénients d'un monopole sans contrôle. Divers essais faits pour y porter remède sont restés sans succès. La loi n'avait d'ailleurs trouvé d'autre remède que de donner à l'État, représenté par les tribunaux, un pouvoir discrétionnaire, et en quelque sorte illimité, sur les actes des compagnies de chemins de fer; mais les habitudes judiciaires n'ont pu se plier à l'application de dispositions aussi étendues, où tout résidait, pour ainsi dire, dans des questions

(*) 4e rapport, § 20.

(**) Si c'est là la préoccupation dominante, ce n'est pas la seule; et la Commission des chemins de fer a, dans un grand nombre de décisions, défendu les compagnies les plus faibles contre les prétentions exagérées des compagnies les plus puissantes.

d'appréciation délicates et dans la modération du juge. A la suite de l'essai qui en fut fait, le Parlement étendit, comme nous l'avons vu, les dispositions réglementaires, les précisant sur certains points, et créa un nouveau tribunal. Ce n'est pas seulement dans l'abréviation des délais et dans la diminution des frais qu'il faut chercher le secret du succès de la juridiction qui fut alors créée ; c'est surtout dans la façon dont elle a appliqué la loi, et su, par là, inspirer confiance au public et aux parties intéressées.

Elle s'est pleinement inspirée de l'esprit qui avait présidé à sa formation en cherchant partout le moyen de faire bénéficier le public, dans les différends même où il n'était pas directement intéressé, et où des compagnies en désaccord se présentaient seules devant elle. Mais c'est ici que ressortent les avantages qu'a retirés l'Angleterre de la façon dont s'était constitué son réseau. Nous ne voulons point dire qu'elle n'en ait retiré que des avantages, ni même que la somme du bien surpasse celle du mal; mais il est impossible de ne pas remarquer que si tout le trafic de l'Angleterre eût été concentré entre les mains d'un très-petit nombre de compagnies, si, même sous l'empire des conventions qui assurent l'entente dans le système d'exploitation, il ne subsistait pas une très-grande variété et complexité d'intérêts, il ne se serait point trouvé de plaignants pour déférer à la Commission les affaires dans lesquelles elle a su faire prévaloir l'intérêt du public.

Il ne faudrait pas d'ailleurs mesurer uniquement les résultats obtenus au nombre des jugements rendus par la Commission. Lorsque la jurisprudence fut bien établie, au moment même où le plus grand nombre d'affaires lui furent déférées, il arriva souvent que les questions qui lui furent soumises reçurent une solution avant qu'un jugement n'intervînt. La discussion, la nécessité d'étudier l'affaire d'une façon plus approfondie, y furent bien pour quelque chose; mais la prévision qu'avait chacun du jugement qui

devait intervenir, en présence d'une jurisprudence fixe, est sans contredit la cause principale de ces nombreux compromis.

Le nombre des cas où la certitude de voir le différend tranché dans tel ou tel sens amena une transaction avant même que l'affaire ne fût déférée à la Commission est sans doute, quoique inconnu, encore plus considérable. Et enfin le même motif a dû prévenir de la part des compagnies bien des mesures injustes et bien des empiétements.

Il ne faut, d'autre part, rien s'exagérer. La Commission a constaté, et la constatation avait été faite maintes fois avant elle, que la loi était inappliquée sur bien des points; que notamment les compagnies ne publiaient point leurs tarifs, ne respectaient point leurs maximums; qu'elles ne se conformaient point aux clauses des actes du Parlement qui avaient autorisé leur création.

C'est que, nous l'avons dit, il n'existe point de contrôle organisé pour signaler ces manquements; les lois et les règlements restent donc à peu près lettre morte.

Un remède partiel a été apporté à cet état de choses par la création de la Commission des chemins de fer; mais, d'une part, le contrôle exercé par les parties lésées n'est pas à lui seul suffisant, et de l'autre ce contrôle insuffisant ne s'exerce lui-même que dans le cas où l'inobservation des règlements lèse une partie autorisée par la loi de 1873 à faire entendre sa plainte. Or toutes les parties qui peuvent être lésées sont loin d'avoir un pareil droit. Dans un grand nombre de cas les compagnies de chemins de fer peuvent seules élever la voix, et le jour où ces dernières reconnaîtraient que la Commission se préoccupe plus de l'intérêt du public que de celui des compagnies plaignantes elles-mêmes, le remède aurait singulièrement perdu de son efficacité. La Commission a demandé, ainsi que nous l'avons

dit, une modification de ses attributions en ce sens (*). Elle voudrait que l'on étendît sa compétence, que toute personne intéressée pût la saisir; elle voudrait aussi (et quoiqu'elle insiste moins sur ce point, c'est celui qui nous paraît le plus important) que l'on précisât les termes de la loi, qu'elle est en quelque sorte chargée de créer par interprétation.

Quel est l'avenir de la Commission des chemins de fer? Elle a été créée pour cinq ans, prorogée pour une année,

---

(*) Notamment dans les deux passages suivants :

« Nous remarquons qu'un très-petit nombre d'instances ont été « introduites par des individus isolés. Toute espèce de procès « constitue un ennui et une dépense. Un individu isolé n'engage « pas volontiers un différend judiciaire avec une compagnie dont « les ressources peuvent rendre le procès très-couteux, quoique « les frais en soient taxés par nous. Il ne s'y décide que lorsque « ses intérêts particuliers sont lésés, comme dans les cas d'injuste « préférence. S'il veut se plaindre qu'on ne lui accorde pas les « facilités qui lui sont dues, il doit d'abord prouver que le public « n'est pas moins intéressé que lui; et il juge naturellement qu'un « avantage dont bénéficiera le public devrait être obtenu sur la « demande et aux risques, soit d'un représentant de l'intérêt gé- « néral, soit d'un groupe d'intéressés, et non d'un seul individu.... « Le remède consisterait à autoriser toute personne à se plaindre « à nous, lorsque l'intérêt public serait lésé; et lorsque ce dernier « point nous serait suffisamment démontré, nous pourrions déli- « vrer un certificat substituant le représentant de l'État au plai- « gnant pour la suite de la procédure » (4e rapport, § 19).

« Le pouvoir que nous exerçons en cette matière est limité par « certaines restrictions qu'il y aurait intérêt à faire disparaître. « Une juridiction qui ne peut être exercée qu'à la demande d'une « compagnie de chemins de fer reste sans effet dans tous les cas « où les intérêts du public sont différents de ceux des compa- « gnies..... Une des restrictions auxquelles nous faisons allusion « est celle qui se rapporte aux tarifs communs..... Nous sommes « autorisé à répartir ces tarifs entre les compagnies comme nous « l'entendons; mais nous ne pouvons fixer pour montant du tarif « d'autres chiffres que ceux contenus dans la demande des parties. « Nous pensons qu'il serait bon de nous donner les mêmes pouvoirs « pour le tarif lui-même que pour la répartition de ce tarif » (4e rapport, § 14).

et la question de son maintien va être soumise à bref délai au Parlement.

D'après nos renseignements, ce maintien, avec ou sans modification, est certain. L'opinion est avant tout frappée des résultats considérables qu'elle a obtenus et des satisfactions importantes qu'elle a procurées à l'intérêt public. Il sera sans doute objecté que les pouvoirs qu'on lui a donnés sur les compagnies de chemins de fer sont bien étendus; mais cette objection n'acquerrait évidemment de la valeur que le jour où elle ferait de ses pouvoirs un usage autre que celui qu'elle en a fait jusqu'ici (*). La meilleure preuve que ce côté de la question a peu frappé les esprits, et que le courant de l'opinion est dirigé dans un sens différent, c'est que les tribunaux judiciaires eux-mêmes, qui n'avaient point osé appliquer la loi de 1854, ont partout confirmé les décisions de la Commission qui leur ont été soumises.

Les juges se sont, il est vrai, parfois divisés, là où les membres de la Commission avaient été unanimes; il est arrivé une fois qu'ils ont tenté de restreindre le pouvoir discrétionnaire de la Commission ; mais ce sont là de bien petites divergences ; et si l'on peut y voir les signes d'habitudes d'esprit différentes, il est évidemment impossible d'y trouver les indices d'une tendance à la réaction (**).

La Commission sera-t-elle maintenue ? Cela est certain ; si ses attributions doivent être modifiées, il ne paraît pas probable que ce soit dans un sens restrictif ; mais son rôle

---

(*) Voici ce que dit à ce sujet la Commission elle-même :
« Nous avons entendu dire parfois que les pouvoirs qui nous sont « accordés en ce qui concerne les tarifs communs pourraient « constituer un danger pour le droit de propriété des Cies de che- « mins de fer. Mais ils n'ont certainement jusqu'ici causé aucun « tort ni développé aucune tendance dangereuse; ils ont produit, « au contraire, d'excellents effets, en aidant à l'entente des com- « pagnies » (4e rapport, § 14).

(**) Voir notamment 5e rapport, §§ 1 à 7.

ira-t-il acquérant de plus en plus d'importance? Il est difficile de tirer d'une statistique qui s'étend à un si petit nombre d'années et à un si petit nombre d'affaires, des conclusions absolument certaines. Toutefois, si la diminution du chiffre des affaires dans les dernières années ne doit pas s'expliquer uniquement par l'incertitude sur la durée de la Commission, il nous semble qu'on peut en rendre compte d'une façon plausible par les observations suivantes.

Lorsque la jurisprudence de la Commission sur l'application de tel ou tel article est établie, les intérêts lésés jusqu'alors accourent pour se faire rendre justice; puis ce mouvement ne tarde pas à s'arrêter, car à mesure que le nombre des décisions augmente, les compagnies se découragent dans leurs empiétements et l'article est de mieux en mieux observé. C'est ainsi que la clause d'injuste préférence, déjà appliquée avant la création de la Commission et sur l'application de laquelle il y avait le moins de doute, a donné lieu dès le début à un grand nombre d'affaires qui n'a pas tardé à subir une diminution. Au contraire, la clause de « *defficient accomodation* », moins précise et qui n'avait pour ainsi dire jamais été appliquée, n'a donné lieu d'abord qu'à un petit nombre de jugements, et le nombre de ses applications n'a pas tardé à croître sensiblement à mesure que l'on connaissait mieux l'extension qu'y donnait la Commission.

Quant aux questions d'arbitrage entre compagnies, l'explication serait peut-être différente, et il ne semblerait pas impossible d'admettre que les compagnies, constatant que l'intérêt du public passait toujours, aux yeux des juges, avant l'intérêt de la compagnie plaignante elle-même, aient renoncé à s'adresser aussi souvent à elle.

Quoi qu'il en soit de ces explications, nous pensons avoir suffisamment établi ce que nous disions au début de cette étude : Les Anglais, après avoir laissé aux entreprises de

chemins de fer une liberté illimitée, ont senti la nécessité de ressaisir les droits de l'État. La concurrence avait presque entièrement disparu et le monopole subsistait avec tous ses abus. L'État a trouvé alors dans la complexité des intérêts créés au début par la liberté, un auxiliaire puissant pour établir son influence ; il a dû d'ailleurs pousser le principe de l'intervention d'autant plus loin que ce principe avait été au début plus complétement méconnu, et que la constitution de l'État rendait une surveillance administrative plus difficile, on pourrait dire plus impossible.

Aujourd'hui l'État anglais a et exerce vis-à-vis des compagnies certains pouvoirs que l'État français ne possède ni n'exerce.

Sans doute la plupart des attributions de la Commission des chemins de fer ne servent qu'à réparer, incomplétement même des omissions graves, comme par exemple la juridiction relative au « *terminal charges* » qui rend, effectifs les maximums imposés aux tarifs ; d'autres vont cependant plus loin que nous n'allons en France : celles, par exemple, qui donnent à la Commission des pouvoirs étendus sur les tarifs, le nombre et les heures des trains, l'établissement de tarifs communs et leur répartition.

Ce pouvoir est, il est vrai, limité par le petit nombre de parties autorisées à faire appel au nouveau tribunal. Il est limité plus encore par ce fait que les abus ne sont point signalés par un contrôle administratif permanent, mais seulement par les parties lésées. Il est limité aussi par la compétence et l'esprit de justice éclairé des membres de la Commission.

Il n'en reste pas moins vrai que c'est là un pouvoir considérable et, à ne regarder que les termes de la loi, presque arbitraire et illimité, et que dans un pays fortement centralisé comme la France, il conduirait peut-être à des résultats excessifs. C'est un remède presque violent à des maux très-sensibles, provenant du défaut de centrali-

sation et d'un excès en sens opposé. Nous sommes convaincu qu'en France il suffirait de beaucoup moins pour sauvegarder l'intérêt public plus efficacement même qu'il n'est sauvegardé en Angleterre.

Nous croyons cependant qu'il ne saurait être sans intérêt de faire voir, d'une part, comment l'Angleterre, après s'être affranchie de ce qu'il y avait de fâcheux dans le principe de la libre concurrence appliqué aux chemins de fer, a bénéficié de ce que ce même principe contenait d'utile ; comment l'action de l'État arrêtée par le défaut de centralisation a trouvé un puissant auxiliaire dans l'application antérieure de ce principe; et de montrer, d'autre part, jusqu'à quel point un des pays les plus libéraux a poussé l'ingérence administrative en ce qui concerne les chemins de fer.

ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES.

CHRONIQUE.

Août 1879.

N° 46

Mémoire sur le roulage, publié dans le numéro de Juin 1879.

ERRATA.

Page 367, Note, *lisez* : La première idée de cette substitution paraît appartenir à M. Minard, car on lit dans son article de 1832 (*Annales*, tome IV, page 132) : « Je regrette beaucoup de n'avoir « pu joindre à ces expériences le poids du cheval..... Il est permis « de croire que la force des chevaux est principalement propor- « tionnelle à leur masse ». Ensuite est venu M. de Gasparin, qui a pesé les chevaux employés dans ses expériences. Enfin, dans son mémoire de 1871 (*Annales*, tome I), M. L. Durand-Claye a introduit explicitement le rapport du poids du véhicule chargé à celui du cheval.

Page 385, ligne 4, *au lieu de* : « sont connus », *lisez* : « est connu ».

Page 397, ligne 25, *ajoutez* : Pour augmenter notablement la charge par quintal d'attelage, il faudrait étendre l'opération aux rampes de 5 et de 4.

Page 399, lignes 20 et 21, *lisez* : « Quand la route est presque horizontale, il vaut mieux calculer la charge en raison d'un moindre effort maximum (voir pages 384 et 385) ».

Page 416, ajouter à la fin du premier alinéa : Il est impossible d'affranchir ces services de la fréquence des démarrages; cela explique, pour une certaine part, qu'on soit obligé d'avoir un si grand nombre de chevaux par voiture. Voir l'article déjà cité de M. Tresca (*Annales* de 1861, page 214) : « Chaque cheval dépensait

« donc pendant le trajet un travail de 19.575 × 3,35 = 65,57 kilo-
« grammètres par seconde, travail qu'il pourrait facilement sup-
« porter pendant quelques heures par jour, si le travail énorme
« du démarrage n'était de nature à le fatiguer outre mesure ».

N° 47

Wagon pour l'éclairage électrique. — D'après la *Revue générale des chemins de fer*, la compagnie du chemin de fer du Nord-Empereur-Ferdinand a fait aménager spécialement un wagon pour l'éclairage au moyen de la lumière électrique des voies et stations dans les cas d'urgence : c'est un wagon à marchandises couvert, renfermant une machine à vapeur de 4 chevaux et une machine Gramme permettant d'obtenir un pouvoir éclairant de 1.440 Carcel. La lampe électrique peut être abaissée ou relevée, et des réflecteurs divers permettent d'envoyer la lumière sur les points à éclairer.

L'installation de ce wagon, y compris le prix de la machine à vapeur, a coûté 7.800 francs.

L'*Union* (VEREIN) *des chemins de fer allemands.* — La *Revue générale des chemins de fer* publie un article intéressant sur l'Union (*Verein*) des chemins de fer allemands, d'où nous extrayons les renseignements suivants :

L'Union réunit aujourd'hui 110 administrations diverses, représentant un réseau de 53.385 kilomètres, et c'est grâce à son organisation puissante que ce réseau si morcelé ne présente pas, au point de vue de l'exploitation, des inconvénients que l'on serait porté à craindre.

L'association a pour but de faciliter, par une communauté d'action, la recherche de tous les moyens propres à favoriser et à défendre les intérêts des chemins de fer allemands et à les concilier avec ceux du public. Elle tend, tout en laissant à chacun des associés une certaine liberté d'allure, à l'adoption de règles générales uniformes pour tous les points fondamentaux de la construction et de l'exploitation de chemins de fer affiliés.

L'étude des questions à soumettre à l'assemblée générale est faite par des commissions permanentes ou spéciales. Les contestations entre les membres du *Verein* sont résolues par voie d'arbitrage et à l'exclusion de tout recours judiciaire.

Il importe de remarquer que, par les statuts de l'association même, les diverses administrations ont une liberté absolue dans les questions de tarifs.

Nous résumons comme suit la solution des principales questions qui ont été traitées dans la réunion de 1878 :

1° Il est, en général, nuisible de faire des encoches aux rails en acier; on peut les éviter, car on peut s'opposer au cheminement des rails par l'emploi d'éclisses-cornières, de cornières de joints et de plaques de tôle verticales intercalées dans les joints.

2° Il n'est pas nécessaire, pour cintrer un rail Bessemer, de le faire chauffer ; on peut redresser, sur place, des rails légèrement faussés.

3° Bien que les résultats ne soient pas définitifs, on peut fixer de 10 à 20 millions de tonnes le poids brut dont le passage détermine l'usure de 1 millimètre du champignon des rails en acier (faibles déclivités, courbes de grands rayons). D'autre part, le passage de 1 à 2 millions de tonnes suffit pour produire le même effet dans des lignes à rampes de 0^{m},025 et à courbes de 200 mètres de rayon.

4° Lorsque l'on se sert de crampons, il ne convient de percer préalablement les traverses que si elles sont en bois dur (opinion de la majorité).

5° Il semble préférable, pour fixer les rails sur les traverses, d'employer des tire-fond plutôt que des crampons.

6° L'emploi de longrines métalliques paraît devenir de plus en plus répandu dans les lignes de l'Union : le rail a le profil habituel et les longrines sont d'une seule pièce; dans ce cas, on peut réduire la largeur de la plate-forme.

7° Pour empêcher le chevelu des racines d'envahir et d'obstruer les tuyaux de drainage, on a employé avec succès les moyens suivants: entourer les joints d'algues marines; recouvrir les tuyaux de scories de houille; entourer les tuyaux de cendres de houille dont on a enlevé la poussière trop fine et les trop grosses scories.

8° Le joint en porte-à-faux est préférable au joint appuyé, quoiqu'il nécessite l'emploi d'éclisses plus fortes: les traverses contre-joint peuvent être placées à 0^{m},50.

9° La concentration en un même point de la manœuvre des aiguilles paraît être, dans tous les cas, avantageuse et doit être recommandée;

10° L'emploi d'appareils destinés à assurer le contact parfait entre l'aiguille et la contre-aiguille est de nature à augmenter la sécurité de l'exploitation.

11° La construction des voies de garage en pente pour le rangement des wagons diminue le temps nécessaire pour cette opération.

12° On recommande l'emploi des changements de voie construits complètement en fer.

13° L'emploi de batteries de plaques tournantes au lieu de changements de voie devant les halles et les quais à marchandises, paraît avantageux.

Nous n'avons donné que les réponses qui paraissent précises, en négligeant celles qui se rapportent à des détails ou à de simples mesures numériques. Nous continuerons ultérieurement ce résumé sommaire, lorsque la suite des documents aura été publiée.

Les chemins de fer en Belgique en 1877. — Les lignes de chemins de fer exploitées en Belgique pendant l'année 1877 se divisent comme suit :

	LONGUEUR EFFECTIVE		TOTAL.
	à double voie.	à simple voie.	
Chemins de fer exploités par l'État. .	1.205	952	2.157
Chemins de fer exploités par des compagnies.	207	1.280	1.487
Totaux.	1.412	2.232	3.644

L'État a construit 715 kilomètres qui ont coûté, matériel d'exploitation non compris, 302.778.855 francs, soit 423.499 francs par kilomètre. Les dépenses de matériel d'exploitation (basées sur une longueur de 2.145 kilomètres se sont élevées à 75.720 francs par kilomètre. Le prix d'établissement d'un kilomètre de chemin de fer exécuté par l'État peut donc être évalué, matériel d'exploitation compris, à 499.219 francs.

Le tableau suivant résume les principaux chiffres relatifs à l'exploitation :

	CHEMINS de fer de l'État.	COMPAGNIES diverses.	TOTAUX.
Longueur moyenne exploitée.	2.145 kilom.	1.718 (*)	3.863
Recette kilométrique.	42.102 fr.	22.190 fr.	33.245 fr.
Dépense kilométrique d'exploitation. .	25.793	13.231	20.204
Produit net.	16.314	8.959	13.041
Rapport p. 100 de la dépense à la recette.	61,24	59,63	60,77

(*) Y compris 231 kilomètres de lignes exploitées à l'étranger.

Relativement aux accidents pendant l'année 1877, et sans établir de distinction entre les chemins de l'État et les chemins exploités par les compagnies, nous citerons les chiffres suivants:

	TUÉS.	BLESSÉS ou contusionnés.	TOTAUX.
Voyageurs.	4	29	33
Employés.	77	185	262
Personnes étrangères.	72	47	119
Totaux.	153	261	414

La proportion du nombre de voyageurs victimes d'accidents au nombre de voyageurs transportés est de :

1 voyageur tué pour. 13.000 033
1 voyageur blessé pour. 1.793.108
1 voyageur tué ou blessé pour. 1.575.761

Ces chiffres sont extraits de la *Revue générale des chemins de fer*.

C. M. G.

N° 48

BULLETIN BIBLIOGRAPHIQUE.

Ouvrages anglais (1879).

ADAMS (W. H. D.). — Lighthouses and Lightships : A Descriptive and Historical Account of their Mode of Construction and Organization. New ed., revised. With Illustrations from Photographs, etc. Post 8vo. *Nelsons.*

Les phares et les feux flottants.

CLEOPATRA NEEDLE (The). — Its Transport from Alexandria to London, and its Erection on the Thames Embankment, 1877-78. 3 Plates, 2 Diagrams. Copy of the Memorial Deposited in the Pedestal of the Cleopatra Needle, September 12th, 1878. Imp. 4to, pp. 8. *Engineering Office.*

Transport et érection de l'aiguille de Cléopâtre.

CODRINGTON (Thomas). — The Maintenance of Macadamised Roads. 8vo, pp. 184.

L'entretien des routes macadamisées.

DENTON (J. Bailey). — House Sanitation, Water Supply, and Domestic Filtration. Some Remarks on the Internal Water Supply of Dwellings, and the Best Means to be adopted for the Removal of the Contaminations which result from its storage in Tanks and Cisterns. With Description of the Self-Supplying Aërated (Oxidising) Filter. 8vo, pp. 16, and Sketch of Dwelling.

Assainissement des maisons, distribution d'eau, etc.

DRINKER (H. S.). — Tunnelling, Explosive Compounds, and Rock Drills : With Profiles, Maps, and over 1.000 Illustrations. 4to, hf-bd, *New York.*

Construction des tunnels, composés explosifs, etc.

GREENE (C. E., A. M.). — Trusses and Arches Analyzed and Discussed by Graphical Methods. Part 2, Bridge-Trusses. With 10 Plates. 8vo, pp. 177. *New York.*

Fermes et ponts analysés par la méthode graphique.

Gripper (Charles F.). — Railway Tunnelling in Heavy Ground. 4to.

Construction des tunnels dans les terrains résistants.

Hutchinson (E.). — Girder Making and the Practice of Bridge Building in Wrought Iron. 8vo.

Pratique de la construction des ponts en fer.

Parliamentary Papers.

Highways. Receipts and Expenditure, 1876. Return. 10d.

Routes. Recettes et dépenses.

Railways. General Report on Accidents for 1877. 7d.

Railway Accidents, 1878. Returns. Inspectors' Reports, Sept.-Dec. Plans. 5s. 9d.

Railway Accidents. Returns for Half-Year, June 1878. 1s. 3d.

—— Returns for 9 Months ending September 30.

—— Return for Jan., Feb., March. 2s. 8d.

Railways. Accidents. Returns and Reports. Jan. to March, 1879. *Maps*. 3s. 2s.

Documents divers relatifs aux accidents de chemins de fer.

Railways. Signal Arrangements. Return. 8d.

Signaux de chemins de fer.

Railways. General Report on Traffic, Passengers, etc., for 1877.

Rapport général sur le trafic, les voyageurs, etc.

Street Accidents. Return. 2d.

Accidents des rues.

Thames River. Prevention of Floods. Report and Evidence. 1s. 6d.

Défense contre les inondations de la Tamise.

Tramways. Use of Steam Power. Report and Evidence. 2s. 6d.

Emploi des moteurs à vapeur sur les tramways.

Parsloe (Joseph). — Our Railways : Sketches, Historical and Descriptive, with Practical Information as to Fares and Rates, etc., and a Chapter on Railway Reform. Post 8vo, pp. 404. *C. Kegan Paul.*

Les chemins de fer d'Angleterre.

Slagg (C.). — Sanitary Work in Smaller Towns and in Villages. Post 8vo. *Crosby Lockwood.*

Travaux d'assainissement dans les petites villes.

SPOONER (C. E.). — Narrow Gauge Railways. 2nd ed. 8vo.

Chemin de fer à voie étroite.

TRANTWINE (J. C., C. E.). — A New Method of Calculating the Cubic Contents of Excavations and Embankments by the Aid of Diagrams. Together with Directions for Estimating the Cost of Earthwork. With 10 plates. 6th ed. 8vo, pp. 60. *Philadelphia.*

Calcul des déblais et des remblais à l'aide de diagrammes.

WEISBACH (Dr. P. J.). — A Manual of the Mechanics of Engineering and of the Construction of Machines. Vol. 2. Translated by A. J. Du Bois, with Additions, Showing the latest American Practice, by R. H. Buel, C. E. Illustrated. 8vo, pp. viii-559, *New York.*

Mécanique de l'art de l'ingénieur.

WELLS (W. H.). — Hints on Levelling Operations as Applied to the Reading of Distances by the Law of Perspective, and the Saving thereby of Chainmen in a Level Survey. With Remarks on the other Advantages that can be gained in the Survey by adopting this Principle in the use of any Ordinary Levelling Telescope and Staff. 8 vo, pp. 16.

Remarques sur le nivellement.

Ouvrages allemands.

BELCSAK, C. Hardy's Vacuum-Bremse. Nebst einem Anhang über Hardy's automatische Vacuum-Bremse. Mit 8 Taf. Wien, 1879. Leipzig, Kittler. 8°, 45 pp. 4 m. 50 d.

Les freins à vide de Hardy.

DIETRICH, E. Umdruck-Zeichnungen von Brücken in Stein, Eisen und Holz. Für den Unterricht an der königlichen Bau-Akademie zu Berlin zusammengestellt. Berlin, 1878. 5 m.

Dessins de ponts en pierre, en fer et en bois.

KLASEN, L. Handbuch der Fundirungs-Methoden im Hochbau, Brückenbau und Wasserbau. Zum Gebrauche für Architekten, Ingenieure, Baumeister, etc. Mit 166 eingedr. Holzschn. u. 6 lith. Taf. Leipzig, 1879. Baumgärtner. 8°, V, 176 pp.

Traité des fondations.

MEISSNER, G. Die Hydraulik und die hydraulischen Motoren. Ein Handbuch für Ingenieure, Fabrikanten und Constructeure. Zum Gebrauche für technische Lehranstalten, sowie ganz besonders

zum Selbstunterricht. II. Bd. Die Turbinen und Wasserräder. 3 Heft. Mit 7 Steintafeln. Jena, 1878. Costenoble. 8°, p. 113-172.

L'hydraulique et les moteurs hydrauliques.

Ouvrages italiens.

CAGNACCI (F.). Del movimento delle arene nella formazione delle spiaggie e dune del mare : memoria. Firenze, tip. dell' Arte della Stampa. In-8, pag. 8. Dalla Riv. Scient.-Ind. di sett.-ott. 1878.

Le mouvement des sables et la formation des dunes.

CHICCHI (ing. dott. Pio). Corso teorico-pratico sulla costruzione dei ponti metallici, ad uso degli allievi delle scuole di applicazione e degli ingegneri e costruttori. Padova, Angelo Draghi lib. e Luigi Donaudi litogr., editori (tip. del Seminario). In-8 gr. — Dispenza 1. a pag. 82 con fig. intercalate nel testo e tre tav. — L. 4.

Construction de ponts métalliques.

A. FAVARO. Sopra due lettere inedite di Giuseppe Luigi Lagrange, pubblicate da D. B. Boncompagni. Padova, 1879.

Sur deux lettres inédites de L. Lagrange.

—— Sulla elica calcolatoria di Fuller (Estr. dal vol. V. ser. V. degli Atti del R. Instituto veneto di scienze, lettere ed arti).

Sur l'hélice à calcul de Fuller.

—— Procedimento grafico per la riduzione degli angoli al centro di stazione. Torino, 1877.

Procédé graphique pour la réduction des angles au centre des stations.

GENALA (Francesco), relatore. Questionario proposto dalla Commissione d'inchiesta sull'esercizio delle ferrovie italiane. Milano, tip. del Sole. In-4, p. 28.

Questionnaire proposé par la commission d'enquête de l'exploitation des chemins de fer italiens.

GROVE (O.). Della locomotiva in generale e delle sue proporzioni : traduzione autorizzata dal tedesco di O. Moreno ing. capo servizio del materiale e della trazione delle Ferrovie Meridionali. Torino, Ermano Loescher, lib.-edit. (tip. del Monitore delle Strade Ferrate). In-8 gr. pag. XVIII-156. — L. 6.

De la locomotive.

Curioni (ing. Giovanni), relatore. Sulle ferrovie di accesso al Sempione e al Gottardo : Relazione della Deputazione al Consiglio Provinciale di Novara, con le relative deliberazioni ed allegati. Novare, tip. Novarese di N. Lenta. In-8, p. 100.

Les chemins de fer d'accès au Simplon et au Saint-Gothard.

Marignani (ing. Cesare). Idraulica pratica. Rapporto fra l'altezza del rigurgito e la grandezza della luce viva nelle botti sotterranee o tombe idrauliche : discussione. Roma, tip. C. Voghera. In-8, pag. 268 e 1 tavola. — L. 6.

Hydraulique pratique.

Martino (Edoardo). Delle strade vicinali : rivista di giurisprudenza. Napoli, 1878, G. De Angelis e figlio. In-8, p. 40. — L. 2.

Les chemins vicinaux.

Ministero dei Lavori Pubblici. Relazione statistica sulle costruzioni di strade ordinarie a cura e conto dello Stato (nazionali e provinciali sovvenute), presentata alla Camera dei Deputati dal Ministro dei lavori pubblici (Baccarini) nella tornata 5 luglio 1878. Roma, tip. Eredi Botta, 1878. In-4, pag XXIII, 176.

Statistique sur la construction des routes.

Piena (Sulla) del Tevere del novembre 1878. Roma, stab. Giuseppe Civelli, 1878. In-16, pag. 12 e 1 tav. — Dal Giorn. dei Lav. Pubb. e delle Str. Ferr. a. V, 1878.

La plaine du Tibre.

Pini (ing. Giovanni). Il prosciugamento del lago Fuccino : narrazione storica-tecnica dai tempi di Giulio Cesare fino ai giorni nostri. Firenze, tip. Carnesecchi. In-16, pag. 80. — L. 1 50.

Le desséchement du lac Fucino.

Prontuario dell' ingegnere, pubblicato dalla società Hütte, tradotto sulla undecima edizione tedesca dagli ingegneri Carlo Moleschott ed Adolfo Rossi; con più di 400 incisioni nel testo. Parte prima. Torino, Ermanno Loescher lib.-edit. (tip. Bona). In-8, pag. XV-488. — L. 5. — Prezzo di ciascuna parte separatamente L. 5; anticipato per l'opera completa L. 9. — Dopo la pubblicazione della seconda parte, che sarà più voluminosa della prima, il prezzo dell' opera completa verrà fissato a L. 10.

Manuel de l'ingénieur.

N° 49

LE RHONE ET LES RIVIÈRES A LIT AFFOUILLABLE.

ÉTUDE DU RÉGIME DU RHONE

ET DE L'ACTION EXERCÉE

PAR LES EAUX SUR UN LIT A FOND DE GRAVIERS INDÉFINIMENT AFFOUILLABLE

Par M. P. DU BOYS, ingénieur des ponts et chaussées.

Nous nous proposons de résumer dans cette note les idées théoriques qui nous ont été suggérées par l'étude du Rhône, et dont nous nous inspirons pour appliquer d'une manière rationnelle les règles pratiques en usage dans le service en vue d'améliorer le chenal navigable de ce fleuve.

Ces idées sont basées sur l'observation des faits et prêtent fort bien, croyons-nous, à leur interprétation. Cependant nous n'osons pas dire qu'elles ont pour elles la sanction complète de l'expérience, parce que nous n'avons pu, jusqu'à présent, réunir un nombre suffisant de déterminations très-précises sur les pentes, les débits, et surtout la répartition et le transport des cailloux dans le lit par différents états du fleuve, et ce sont là les principales données de notre discussion.

Quelle que soit, d'ailleurs, l'opinion que l'on doive s'en faire, elle ne devra pas ébranler la confiance dans le succès des travaux que nous poursuivons, car les règles pratiques

qui sont suivies reposent sur des faits et sont indépendantes de nos vues théoriques.

Nous commencerons par donner des indications générales sur le régime du Rhône, et nous montrerons comment le problème de l'amélioration des hauts fonds nous a conduit à étudier les lois du transport des graviers sous l'action des eaux. Cette étude formera la base de notre travail; nous la développerons en recherchant comment un courant façonne le fond suivant la disposition des berges, en supposant successivement le débit constant et variable. Enfin nous essayerons de montrer comment notre théorie concorde avec les faits.

I.

Régime du Rhône entre Saint-Vallier et l'Ardèche.

La partie du Rhône comprise dans notre service s'étend du pont de Saint-Vallier à l'embouchure de la rivière d'Ardèche, sur une longueur de 115 kilomètres environ. C'est la seule dont nous parlerons.

Débit d'étiage et pente moyenne. — Elle se trouve divisée en deux sections bien distinctes à l'embouchure de l'Isère. La première est caractérisée par un débit d'étiage de 230 mètres cubes environ par seconde et une pente kilométrique moyenne, assez uniformément répartie, de $0^{m},56$. Sa longueur est d'environ 28 kilomètres.

La seconde est caractérisée par un débit d'étiage d'environ 335 mètres cubes et une pente moyenne kilométrique de $0^{m},788$. Sa longueur est de 87 kilomètres.

Affluents. — L'Isère verse donc dans le Rhône un volume d'eau qui est d'environ 100 mètres cubes par seconde à l'étiage. Cette eau est presque toujours très-chargée de sable limoneux.

Les autres affluents, dont les principaux sont : la Galaure, la Drôme et le Roubion, sur la rive gauche, le Doux, l'Eyrieux, l'Ouvèze et l'Escoutaye, sur la rive droite, sont éminemment torrentiels ; ils n'apportent, en temps ordinaire, qu'un volume insignifiant d'eau limpide. Mais pendant leurs crues, qui sont très-fortes et très-courtes, ils entraînent, avec un énorme volume d'eau, des galets de toute grosseur et même des quartiers de rochers qui viennent former écueil près de certaines embouchures.

Nature du lit. — Le sol de la vaste plaine dans laquelle est creusé le lit du Rhône se compose, sur une grande épaisseur, de cailloux roulés recouverts d'une couche variable, mais ordinairement assez mince, de terre végétale. On peut donc dire, d'une manière générale, que le Rhône coule dans une masse indéfinie de cailloux, car nous n'avons pas à parler ici des points, très-rares, où l'on rencontre le rocher au fond du lit.

Nous avons adopté, pour ligne d'étiage, le niveau que nous avons constaté le 16 novembre 1874 et qui correspond bien à un minimum extraordinaire dans le débit du Rhône ; c'est à la suite d'observations faites vers cette époque que nous avons établi les chiffres de débit cités plus haut.

Débit du Rhône à Valence. — Nous avons, de plus, fait à Valence plusieurs séries d'observations pour obtenir une courbe des débits du Rhône en fonction des hauteurs à l'échelle de Valence : aux chiffres que nous avons obtenus, pour des cotes de zéro à 5 mètres, nous avons joint une détermination de la crue extraordinaire du 31 mai 1856, faite par M. Kleitz au moyen d'une méthode que nous ne connaissons pas. Nous avons pu relier graphiquement tous ces résultats par une courbe qui est très-exactement représentée par l'équation suivante :

Q débit, en mètres cubes, par seconde.
H hauteur à l'échelle, en mètres.

$$Q = 325 + 365H + 40H^2 + 14H^3.$$

L'étiage du 16 novembre 1874 correspond à la cote + 0,03 à l'échelle.

Hauteur des crues. — On peut dire que les eaux sont basses tant que la cote est inférieure à 1 mètre.

Le niveau habituel correspond à des cotes de 1 mètre à 2^m,50, et à des débits de 750 à 1.700 mètres cubes.

Les crues ordinaires atteignent souvent 3^m,50 à 4 mètres (débits de 2.700 à 3.300 mètres cubes), et l'on peut considérer 5 mètres (débit de 4.800 mètres cubes) comme la limite des plus grandes crues ordinaires.

Le 31 mai 1856, les eaux sont montées, très-exceptionnellement, à 7 mètres, et M. Kleitz a évalué le débit à plus de 9.500 mètres cubes.

Largeur du lit. — De nombreux travaux ont été déjà exécutés, soit pour la défense des plaines, soit pour la fixation des berges, soit enfin dans l'intérêt de la navigation, et il ne reste guère de longueurs importantes où l'on trouve le lit à son état naturel. Cependant, si nous faisons abstraction des passages où l'on a exécuté des travaux de navigation proprement dits, on peut évaluer ainsi la largeur du lit moyen, c'est-à-dire la distance entre les berges des deux rives :

En amont de l'Isère, de 200 à 300 mètres ;

En aval de l'Isère, de 250 à 400 mètres.

Nous faisons abstraction, en donnant ces chiffres, des points exceptionnels.

Dans les endiguements réguliers qui ont été exécutés depuis 1860 jusqu'en 1873, on a généralement laissé au lit moyen entre les digues submersibles parallèles :

En amont de l'Isère, de 180 à 200 mètres ;

En aval de l'Isère, de 230 à 250 mètres.

Les eaux basses laissent à découvert, dans ces espaces, de grandes plages de gravier au milieu desquelles doit se dessiner le chenal d'étiage. Mais, par des eaux moyennes

(2 mètres à l'échelle de Valence), presque tout est couvert; on ne voit plus que les îlots proprement dits.

Le débordement sur les terres riveraines commence à des hauteurs variables suivant les points; il ne prend de l'importance que quand les eaux dépassent 4 mètres à l'échelle de Valence. Même alors le débit, en dehors du lit moyen, est peu important, sauf sur les points où existent des lônes et des faux bras barrés par des ouvrages submersibles.

Répartition de la pente; mouilles et hauts-fonds. — Si, profitant des basses eaux, on fait un nivellement du bord mouillé, on reconnaît bientôt que la pente se répartit d'une manière fort inégale : presque nulle dans certaines parties, elle atteint ailleurs 2, 3, 4 et jusqu'à 5 millimètres par mètre; c'est du moins le chiffre le plus fort que nous ayons constaté d'une manière précise.

Inutile de dire que les pentes les plus faibles correspondent généralement à des parties où la profondeur maxima est considérable, à des mouilles, et les rapides à des maigres; dans les mouilles, on trouve habituellement de 3 à 6 mètres à l'étiage, et sur les maigres, de $0^m,50$ à $2^m,50$.

Les mouilles et les maigres se succèdent d'une manière assez régulière; sur une longueur de 18 kilomètres, en aval de l'embouchure de l'Isère, on rencontre treize maigres espacés en moyenne de 1.400 mètres; l'espacement minimum étant d'environ 1.000 mètres et l'espacement maximum 1.900 mètres : la pente kilométrique moyenne est de $0^m,79$.

Généralement les grandes profondeurs existent là où le courant est appuyé contre une rive, et les rapides se produisent dans le passage du courant d'une rive à l'autre.

On pourrait être porté à croire que la pente du rapide doit être d'autant plus forte que la profondeur d'eau y est moindre : cette loi ne ressort nullement de nos observa-

tions ; ainsi, dans la région dont nous venons de parler, le dernier maigre, par des eaux marquant 0,16 à Valence, accusait un tirant d'eau de $1^{m},70$, et la pente, mesurée sur 140 mètres, atteignait $4^{mm},8$ par mètre ; c'est la plus forte que nous ayons contatée.

Quand les eaux montent, la pente tend à se répartir d'une manière plus uniforme. Ainsi, sur le haut-fond du Derne (profondeur $1^{m},50$), par des eaux marquant 0,16 à Valence, la pente maxima était $0^{m},003$ par mètre et dans les mouilles d'amont et d'aval elle n'était que de 0,000075 et 0,0001. Dans la même région, par des eaux marquant $2^{m},21$ à Valence, nous avons trouvé sur le maigre une pente de $0^{m},0015$ environ, et dans les mouilles adjacentes, 0,00045 et 0,0003. Dans la mouille située en aval du pont de Valence, dont la pente d'étiage est très-faible, nous avons constaté, par des eaux de $5^{m},03$, une pente de 0,0006.

Vitesse du courant. — Nous ne pouvons rien dire de bien précis sur la vitesse des courants. A l'étiage, la vitesse maxima dans les mouilles est généralement supérieure à 1 mètre; sur les maigres elle peut varier moyennement, suivant les circonstances, de $1^{m},50$ à $2^{m},50$. Pendant les crues la vitesse augmente bien plus rapidement dans les mouilles que sur les maigres. Nous avons constaté les vitesses maxima suivantes dans la mouille qui est en aval du pont de Valence :

		mètres.
Par des eaux marquant	0,08.	1,05
—	1,06.	1,97
—	3,43.	3,21
—	5,03.	4,10

Quand les eaux sont fortes, le courant, dans les parties où les rives sont à peu près régulières, suit une direction sensiblement parallèle à l'axe du lit. Mais il n'en est plus de même en basses eaux.

Direction du courant et forme du thalweg. — En général les mouilles sont alternativement appuyées contre chaque rive et leur sont parallèles; les rapides qui les réunissent sont plus ou moins inclinés sur l'axe général du lit.

Le raccordement de deux mouilles consécutives par un rapide peut présenter bien des formes diverses qui sont comprises entre deux types : le raccordement direct et le raccordement en écharpe.

La *fig.* 1 (Pl. 20) est une figure théorique qui permet de se rendre compte de ce que nous entendons par là. Il y a, entre la mouille A et la mouille B, un raccordement direct. L'extrémité aval de la mouille A s'arrête bien en amont de l'origine amont de la mouille B; le courant, dans le rapide, suit, comme le thalweg, une direction très-peu inclinée sur l'axe du lit. La largeur de la section mouillée mesurée sur le maigre, normalement au courant, est peu considérable; en sorte que, même avec une forte pente, il y faudra une profondeur relativement assez grande pour écouler un volume d'eau déterminé. C'est ce type que nous devons nous efforcer de conserver là où il existe, et de produire à la place du second, là où le second existe; car on ne peut songer, bien entendu, à supprimer les rapides.

De B en C, au contraire, est figuré le 2e type de raccordement, que nous avons nommé raccordement en écharpe. L'extrémité aval de la mouille B est située en aval de l'origine amont de la mouille C; les deux mouilles se trouvent séparées par une longue écharpe de gravier presque parallèle à l'axe du lit et reliée aux deux rives en M et en N. L'eau, pour passer d'une mouille dans l'autre, est obligée de franchir cette écharpe, dont la partie la plus basse forme comme un long déversoir noyé (nous en avons vu qui n'avaient pas moins de 500 mètres de longueur mouillée). Le courant prend une direction presque normale à l'axe général du lit, et le thalweg se déplace facilement. Ces passages sont les plus difficiles à franchir, tant à cause du manque

de profondeur qu'à cause des inflexions brusques du courant.

Un maigre du 2e type peut débiter beaucoup d'eau avec une très-faible profondeur et une faible pente, à cause de son grand développement en travers.

Quelquefois deux thalwegs principaux se creusent en travers de l'écharpe, et le gravier s'amoncelle entre eux de manière à former un îlot. Dans ce cas, une des deux passes s'approfondit, en général, spontanément, car, la largeur du déversoir étant réduite par l'îlot, il faut que l'eau retrouve en profondeur ce qui lui manque en largeur, mais il reste toujours les inconvénients d'un tournant brusque.

On conçoit facilement tous les intermédiaires qui peuvent exister entre ces types extrêmes.

État d'équilibre du fond. — Nous n'avons plus qu'à ajouter une remarque importante pour en avoir fini avec la description du Rhône. Quand les rives sont fixées et que le fond du lit est seul composé de matériaux mobiles, on remarque, dans la configuration du fond, une permanence remarquable. Si l'on fait des dragages sur un point, après quelques crues, on retrouvera comblée la fosse ouverte à grands frais. Certaines plages du Rhône sont des carrières capables de fournir indéfiniment des matériaux pour l'entretien des chemins, les pavages ou les maçonneries. D'une manière générale, on peut dire que, quand on déforme le lit, il tend à se reconstituer. Ce lit est dans un état d'équilibre stable sous l'action des forces qui agissent sur lui.

Problème de l'amélioration du chenal dans un lit affouillable. — Après les explications qui précèdent, il nous semble facile de poser le problème de l'amélioration du chenal navigable sur un fleuve comme le Rhône, où le fond est indéfiniment affouillable. Il se réduit pratiquement à ceci : rechercher dans quelles conditions se trouvent les rapides

où les bateaux passent sans difficulté, soit que les rives se trouvent à l'état naturel, soit qu'elles aient été fixées et rectifiées par des endiguements suffisamment anciens pour avoir produit le nouvel équilibre du fond; réaliser ces conditions dans les passages défectueux; en assurer la permanence dans ceux qui sont actuellement bons.

Mais il nous a semblé intéressant de l'étudier théoriquement d'une manière plus générale, en le formulant ainsi: rechercher quelles sont la nature et l'intensité des forces qui agissent sur le fond du lit pour en mettre les matériaux en mouvement, et étudier comment on peut les utiliser pour produire un équilibre du fond tel que le chenal navigable soit le meilleur possible.

Nous ne traiterons ici que la première partie du problème, c'est-à-dire que nous nous bornerons aux considérations générales qui peuvent avoir leur application partout.

II.

Grandeur et effets de la force d'entraînement.

Nous devons donc commencer par étudier en elle-même la force qui permet aux cours d'eau de déplacer certains matériaux, et que nous désignerons sous le nom de *force d'entraînement*.

Résumé des notions acquises. — C'est chez les auteurs qui ont étudié le régime des torrents que nous avons rencontré les notions les plus complètes sur cette force, car c'est dans les phénomènes torrentiels qu'on en a observé les effets les plus remarquables.

Lois de M. Scipion Gras. — Dans son Étude sur les torrents des Alpes, publiée aux *Annales des ponts et chaussées*,

1857, 2e semestre, M. Scipion Gras pose, d'une manière très-nette (pages 14 à 20), les lois de l'entraînement. Ses idées, basées sur l'observation des faits et sur des considérations très-rationnelles, peuvent se résumer ainsi :

Un caillou, posé au fond d'un courant liquide, peut être déplacé par l'impulsion des filets qui le rencontrent : le mouvement aura lieu si leur vitesse est supérieure à une certaine limite qu'il nomme *vitesse limite d'entraînement*. Cette vitesse limite dépend de la densité, du volume et de la forme du caillou ; elle dépend aussi de la densité du liquide et *de la profondeur du courant*.

Les cailloux de diverses grosseurs tendent à être entraînés avec des vitesses différentes.

Le mouvement des cailloux réagit, en le ralentissant, sur celui des filets liquides qui les entraînent. Il en résulte qu'une fois une certaine quantité de matière en mouvement sur le fond du lit, la vitesse des filets liquides devient trop faible pour en entraîner davantage. Le cours d'eau est alors *saturé*.

Un cours d'eau non saturé tend à le devenir en entraînant une partie des matériaux qui composent son lit, et en choisissant de préférence les plus petits.

Si, par une cause quelconque, la puissance d'entraînement diminue, il y aura dépôt, et, par suite, exhaussement du fond du lit en ce point. Le courant se déchargera d'abord des plus gros matériaux.

L'action réciproque des cailloux entraînés les uns sur les autres peut souvent s'opposer au triage des matériaux selon leur grosseur, soit dans les phénomènes d'affouillement, soit dans les phénomènes de dépôt.

Lois de M. Breton. — M. Philippe Breton commence son mémoire sur les barrages de retenue des graviers par une théorie analogue que nous résumons ainsi :

L'effort d'entraînement de l'eau sur des cailloux croît avec le débit et la pente du lit; il est proportionnel au

carré des dimensions des pierres; il est moindre pour les pierres plates que pour les rondes.

La résistance à l'entraînement dépend du frottement de la pierre sur le fond, lequel est proportionnel au poids de la pierre dans l'eau et à une autre force qui empêche la pierre de se soulever pour rouler sur le fond, et qui est aussi proportionnelle à son poids, c'est-à-dire à sa densité dans l'eau et au cube de ses dimensions. Cette dernière force varie également suivant la forme des pierres et la manière dont elles sont placées les unes par rapport aux autres. Les galets se rangent naturellement de manière à présenter un maximum de résistance.

Les matériaux les moins résistants marchent plus vite et vont plus loin que les matériaux qui présentent une plus grande force de résistance à l'entraînement.

Signalons enfin l'ouvrage de M. Costa de Bastelica sur les torrents, dans lequel l'auteur, partant de la notion d'eau saturée, fait très-bien ressortir la nécessité d'étudier les variations de la force d'entraînement plutôt que sa grandeur absolue.

Rapporter cette force à la pente et à la profondeur. — Toutes les idées que nous venons d'analyser sont sans doute très-justes; mais nous croyons utile de chercher à les préciser davantage, de manière à rapporter l'intensité et les variations de la force d'entraînement à des données susceptibles d'une mesure exacte. Les vitesses, surtout les vitesses du fond, sur lesquelles il existe tant d'incertitude, doivent en conséquence être écartées. Il y a, au contraire, deux éléments susceptibles d'une mesure assez précise, et qui, avec la nature de la paroi, définissent parfaitement le régime d'un courant, ce sont *la pente* et *la profondeur*. C'est sur ces deux éléments que nous allons raisonner.

Expression de la force d'entraînement. — Supposons donc un courant régulier de régime uniforme; la pente par mètre est i et la profondeur H. Considérons, à un instant donné,

un prisme d'eau de hauteur H, s'appuyant sur le fond du lit par sa base, qui sera de 1 mètre carré.

Si le fond n'opposait aucune résistance à l'écoulement, la masse d'eau contenue dans le prisme, glissant sur un plan incliné de pente i, recevrait un accroissement de force vive que l'on peut évaluer.

Soit m la masse d'un filet liquide dont la vitesse est v. Pendant un temps très-court dt, l'accroissement de force vive pour ce filet serait :

$$2mvdv = m \cdot 2g \cdot ivdt \text{ (*)}.$$

Mais le régime étant uniforme, cet accroissement de force vive est complétement détruit par un travail résistant qui a pour expression la moitié de cet accroissement, soit :

$$mgivdt.$$

La force retardatrice qui produit ce travail s'obtient en divisant cette expression par le chemin parcouru vdt. C'est donc :

$$mgi;$$

et la force totale appliquée à tout le prisme liquide est :

$$Mgi,$$

M étant la masse totale du liquide.

Or cette force retardatrice, qui n'est autre que la résistance du fond, développe, comme réaction égale et contraire, la *force d'entraînement* du courant, dont nous avons par conséquent la valeur.

La densité de l'eau étant supposée égale à 1, le poids

(*) En effet, l'accélération du mouvement serait :

$$\frac{dv}{dt} = gi.$$

en kilogrammes de la masse M est 1.000 H, et l'on a $M = \frac{1.000\,H}{g}$. Par conséquent, en désignant par F la force d'entraînement exercée par le courant sur 1 mètre carré de fond, on peut écrire :

$$F = 1000\,Hi.$$

Voilà donc l'expression exacte de la force d'entraînement en fonction de nos deux variables, la pente et la profondeur.

Remarques sur la formule $F = 1.000\,Hi$. — Nous n'aurions pu arriver à un résultat aussi net en comparant cette force à d'autres variables, par exemple aux vitesses du courant, parce qu'il est impossible d'en connaître exactement la répartition, et que le trouble apporté dans l'écoulement par les matières solides en mouvement viendrait encore compliquer le problème.

De plus, tout raisonnement basé sur les vitesses est sujet aux critiques que l'on peut faire à la théorie de l'écoulement par filets parallèles, tandis que notre démonstration subsiste même en dehors de cette hypothèse, en admettant simplement que la force vive sensible reste constante dans l'écoulement uniforme.

On pourrait cependant, en employant des formules bien connues, remplacer dans notre équation, Hi par sa valeur en fonction des vitesses, cela pourra être quelquefois utile. Mais il faudrait alors se tenir en garde contre les incertitudes qui subsistent dans les coefficients de ces formules, et qui seraient encore augmentées ici par l'instabilité du fond, dont on n'a pas tenu compte en les établissant.

Conditions d'équilibre du fond. — Dans un courant donné, un caillou placé au fond du lit se mettra en mouvement si la force d'entraînement qui le sollicite est plus grande que la force résistante qui tend à le maintenir à sa place. Pour pouvoir établir une équation d'équilibre, nous devons

donc maintenant comparer cette force de résistance à la force d'entraînement. Cette seconde partie de notre travail est beaucoup plus délicate, parce que nous sommes obligé de nous appuyer sur des données bien moins précises. Aussi commencerons-nous par faire des hypothèses pour simplifier la discussion.

Hypothèses restrictives. — Supposons tout d'abord que sur un fond inaffouillable s'étende une seule couche de galets, tous de même forme, de même volume, et placés de même. On peut caractériser le volume de chaque galet par une quantité ρ proportionnelle à chacune de ses dimensions, et telle que $\frac{1}{\rho^2}$ représente le nombre de galets pareils qui couvrent 1 mètre carré. Si nous désignons par d le poids spécifique des cailloux, celui de l'eau étant l'unité, chaque galet sera sollicité par une force verticale P proportionnelle à $(d-1)\rho^3$ et par la force horizontale d'entraînement $Q=\rho^2 F$. Nous pouvons poser :

$$P = K(d-1)\rho^3,$$
$$Q = \rho^2 F = 1000\, Hi \cdot \rho^2.$$

La résultante de ces deux forces fera avec la verticale un angle φ tel que l'on aura :

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{1000\, Hi}{K(d-1)\rho}.$$

On voit, dès lors, que les galets considérés seront dans la même situation que des galets de même forme placés sur un plan incliné faisant un angle φ avec l'horizontale et soumis à une force verticale égale à $\sqrt{P^2+Q^2}$. Mais on sait que, dans une telle situation, les galets se mettront en mouvement si l'angle φ est supérieur à un certain angle, analogue à l'angle de frottement, sans qu'il soit nécessaire de considérer l'intensité de la force résultante qui agit sur

eux. Désignons cet angle par α, nous pourrons écrire, comme condition du mouvement :

$$tg\alpha \leqq tg\varphi = \frac{1000\,\mathrm{H}i}{\mathrm{K}(d-1)\rho}.$$

Un courant donné pourra donc mettre en mouvement une couche de cailloux déterminée par la condition :

$$\rho \leqq \frac{1000\,\mathrm{H}i}{\mathrm{K}(d-1)tg\alpha}.$$

La définition précise de l'angle α peut être exprimée ainsi : C'est l'angle suivant lequel on pourrait relever le fond dans une eau tranquille, sans que les cailloux qui le tapissent descendent le long de la paroi inclinée, soit en glissant, soit en roulant les uns sur les autres.

L'angle α variera, peu ou pas, avec la grosseur des cailloux, si leurs formes sont semblables ; mais il se modifiera suivant la forme et l'orientation. Enfin, pour des cailloux d'un volume donné, le produit $\mathrm{K}\rho^3$ étant constant, on voit que ρ varie en raison inverse de $\sqrt[3]{\mathrm{K}}$.

Discussion et extension de la formule : $\rho = \frac{1.000\,\mathrm{H}i}{\mathrm{K}(d-1)\,\mathrm{tg}\,a}$. — La forme des pierres n'étant ni régulière ni susceptible d'une définition mathématique, on ne peut arriver à une discussion pratiquement complète de notre formule.

Mais on peut, en la mettant sous une autre forme, en tirer quelques conséquences. Nous pouvons l'écrire :

$$\mathrm{K}\rho^3 \leqq \rho^2\,\frac{1000\,\mathrm{H}i}{(d-1)tg\alpha}.$$

Or, par définition, $\mathrm{K}\rho^3$ est le volume V d'un galet, et ρ^2 est l'inverse du nombre n des galets compris dans 1 mètre carré. Cette équation revient donc à :

$$\mathrm{V} \leqq \frac{1}{n}\,\frac{1000\,\mathrm{H}i}{(d-1)\,tg\,\alpha};$$

D'où l'on peut conclure que, toutes choses égales d'ailleurs, les galets marcheront d'autant plus facilement que leur volume sera moins considérable et qu'il y en aura un moins grand nombre par mètre carré.

Désignons par e l'épaisseur moyenne de la couche de cailloux, nous aurons évidemment :

$$nV = e,$$

et nous pouvons écrire :

$$e \leqq \frac{1000\,Hi}{(d-1)\,tg\alpha}.$$

Ce qui démontre que, sans tenir compte de la grosseur et de la forme des cailloux, la force d'entraînement nécessaire pour les mettre en mouvement est proportionnelle à leur épaisseur moyenne.

Cette dernière forme sera particulièrement utile pour les généralisations.

Avant d'aller plus loin, il sera peut-être utile de réfuter une objection qui se présente au premier examen de ces formules.

On pourrait en conclure que des cailloux bien plats, posés sur le fond sans y produire d'aspérités, seront entraînés, dans un cours d'eau donné, plus facilement que des cailloux plus petits formant un fond plus irrégulier, mais de même épaisseur moyenne; ce qui serait invraisemblable et contraire à l'observation. Une variation hypothétique dans la valeur de tg α ne suffit pas à rendre compte de cette anomalie. Mais il y a autre chose : nous avons raisonné dans l'hypothèse où le régime uniforme est établi; or, on sait que, pour un débit déterminé, le régime uniforme s'établit dans des conditions de pente et de profondeur bien différentes, suivant la rugosité plus ou moins grande des parois (*); et réciproquement, quand les condi-

(*) Voir les *Recherches hydrauliques*, de MM. Darcy et Bazin.

tions de pente et de profondeur sont données, la vitesse et le débit correspondant à des parois lisses sont bien supérieures à la vitesse et au débit correspondant à des parois rugueuses. Par conséquent, dans un cours d'eau donné, il faudrait une crue bien plus forte pour réaliser les conditions nécessaires à l'entraînement sur un fond lisse que sur un fond rugueux.

Extension au cas où le fond n'est pas horizontal. — Revenons maintenant à notre formule.

En en faisant la démonstration, nous avons posé $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$, ce qui suppose implicitement que le fond est horizontal, ou au moins que sa pente est négligeable. S'il n'en était pas ainsi, la force P restant verticale, la force Q serait parallèle à la pente du fond. Pour appliquer nos raisonnements à ce cas, il faut appeler φ_1 l'angle que fait la résultante de P et de Q avec la normale au plan du fond, et α conservant toujours sa même signification, on posera la même inégalité :

$$\alpha \leqq \varphi_1.$$

On trouvera facilement, en continuant à poser $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P}$ et en appelant σ la pente du fond, dans le sens du courant :

$$tg\, \varphi_1 = \frac{tg\, \varphi}{\cos \sigma} + tg\, \sigma.$$

et l'on pourra écrire :

$$tg\, \alpha \leqq tg\, \varphi_1 = \frac{1}{\cos \sigma} \frac{1000\, Hi}{K(d-1)\varphi} + tg\, \sigma.$$

Sans nous appesantir sur cette formule, nous nous bornerons à remarquer que la valeur de $\operatorname{tg} \varphi_1$ est supérieure à $\operatorname{tg} \varphi$ quand σ est positif, c'est-à-dire quand la pente du fond est dans le sens du courant, et que, au contraire, $\operatorname{tg} \varphi_1$ est inférieur à $\operatorname{tg} \varphi$ quand le fond présente une contre-pente.

En conséquence, une pente dans le sens du courant

favorise le mouvement des galets, une contre-pente tend à s'y opposer ; cela est du reste assez évident.

Généralisation pratique. — Après avoir discuté d'une manière rigoureuse le cas idéal d'une couche de galets tous pareils reposant sur un fond inaffouillable, nous ne pourrons pas être aussi précis dans les généralisations que nous avons à faire.

Épaisseur de la tranche en mouvement. — Supposons que la couche des galets que nous avons considérée jusqu'à présent, au lieu de glisser sur un lit inaffouillable, repose sur une seconde couche sous laquelle sera une troisième couche semblable, et ainsi de suite. L'épaisseur de la première couche ε est telle que l'on ait l'inégalité :

$$\varepsilon < \frac{1000\,\mathrm{H}i}{(d-1)\,tg\alpha}.$$

Cette première couche va se mettre en mouvement avec une vitesse qui sera en rapport avec l'excédant de la force d'entraînement sur ce qui serait nécessaire pour provoquer un mouvement très-lent de cette couche, et qui sera déterminée par la condition que cet excédant de force soit absorbé par la résistance de la deuxième couche. Et cette résistance provoquera une réaction égale et contraire qui sera une force d'entraînement appliquée à cette seconde couche, dont la valeur sera :

$$1000\,\mathrm{H}i - \varepsilon(d-1)\,tg\alpha.$$

Si elle est suffisante, elle provoquera le mouvement de cette seconde couche ε', qui à son tour réagira sur la troisième en développant une force d'entraînement :

$$1000\,\mathrm{H}i - (\varepsilon + \varepsilon')\,(d-1)\,tg\alpha,$$

applicable à cette troisième couche d'épaisseur ε''. Si la troisième couche est entraînée, elle produira, à son tour, sur la quatrième une force d'entraînement :

$$1000\,\mathrm{H}i - (\varepsilon + \varepsilon' + \varepsilon'')\,(d-1)\,tg\alpha,$$

et ainsi de suite. De telle sorte que l'épaisseur totale des couches en mouvement :

$$e = \varepsilon + \varepsilon' + \varepsilon'' + \ldots$$

sera définie par la relation même que nous avons établie plus haut pour déterminer l'épaisseur maxima d'une seule couche en mouvement :

$$e = \frac{1000\,\mathrm{H}i}{(d-1)\,tg\,\alpha};$$

seulement, tandis que l'on devrait admettre que le mouvement d'une seule couche d'épaisseur e serait très-lent, et que par conséquent la quantité de matière passant en un temps donné dans une section serait très-petite, on voit qu'en supposant l'existence de plusieurs couches de faible épaisseur, le mouvement des couches supérieures peut être rapide, en sorte que la quantité de matière entraînée est bien plus considérable.

Quantité de matière entraînée. — Précisons davantage, et cherchons à déterminer, d'une manière au moins relative, les quantités de matière entraînées par un courant.

Supposons que l'on ait, ε étant l'épaisseur d'une couche,

$$e = n\varepsilon = \frac{\mathrm{F}}{(d-1)\,tg\,\alpha},$$

la couche du fond aura une vitesse nulle, et la différence de vitesse entre deux couches sera constante ; désignons-la par v.

La 2e couche aura une vitesse.	v
La 3e.	$2v$
. . . .	
La $(n-1)$e	$(n-2)v$
La ne et dernière.	$(n-1)v$

et le débit de matière ou la quantité q de matière passant par seconde dans 1 mètre de largeur du profil sera :

$$q = \varepsilon v[1 + 2 + \ldots + (n-2) + (n-1)] = \varepsilon v \cdot \frac{n(n-1)}{2},$$

ou bien :

$$q = e \cdot \frac{n-1}{2} v.$$

Si la force d'entraînement devient F' et que l'on ait :

$$e' = n'\varepsilon = \frac{F'}{(d-1)\,tg\,\alpha},$$

on trouvera de même, pour le nouveau débit de matière :

$$q' = e' \frac{n'-1}{2} v.$$

On peut donc écrire :

$$q = q' \frac{e}{e'} \frac{n-1}{n'-1}.$$

Si nous appelons F_0 la force limite d'entraînement pour une seule couche ε, de sorte que l'on ait :

$$\varepsilon = \frac{F_0}{(d-1)\,tg\,\alpha}.$$

il est facile de voir que l'on peut écrire :

$$\frac{n-1}{n'-1} = \frac{F-F_0}{F'-F_0},$$

et par conséquent :

$$q = q' \frac{F}{F'} \cdot \frac{F-F_0}{F'-F_0},$$

ou bien, en posant :

$$\chi = \frac{q'}{F'(F'-F_0)},$$

on a :

$$q = \chi F (F - F_0).$$

χ sera un coefficient caractéristique du débit de matière à déterminer de même que F_0 pour chaque valeur de ε, c'est-à-dire pour chaque nature de cailloux.

Dans un profil en travers de largeur L, mais où la profondeur H est variable d'un point à l'autre, la force totale d'entraînement est évidemment représentée par :

$$1000\, i \int_0^L \mathrm{H}dx = 1000\, i\Omega,$$

Ω étant l'aire totale de la section.

Débit total de matière et lit équivalent. — On peut donc dire que la force totale d'entraînement est proportionnelle à la pente et à la section d'eau. Mais cette notion n'est pas suffisante pour calculer le débit de matière.

En effet, le débit total de matière Q est égal à $\int_0^L q dx$, ou bien :

$$\mathrm{Q} = \chi \int_0^L \mathrm{F}(\mathrm{F} - \mathrm{F}_0)\, dx;$$

mais puisque F = 1.000 Hi, posons :

$$\mathrm{F}_0 = 1000\, \mathrm{H}_0 i,$$

alors nous pouvons écrire :

$$\mathrm{Q} = \chi (1000\, i)^2 \int_0^L \mathrm{H}(\mathrm{H} - \mathrm{H}_0)\, dx,$$

en ayant soin de ne prendre dans la sommation que les parties du lit dans lesquelles H est supérieur à H_0, car, dans les autres, le débit de matière est nul.

Ainsi, pour une section Ω donnée, Q variera avec la forme du lit.

Nous nommerons *lit équivalent* du lit réel, un lit à section rectangulaire de largeur *L* et de profondeur constante *H*, tel que l'on ait :

$$H \cdot L = \Omega = \int_0^L \mathrm{H}\, dx,$$

et

$$HL(H - \mathrm{H}_0) = \int_0^L \mathrm{H}(\mathrm{H} - \mathrm{H}_0)\, dx.$$

Ce nouveau lit, en effet, aura même section que le lit réel, et lui sera équivalent au point de vue du débit de matière.

Remarquons tout de suite que, pour une valeur donnée de Ω, le débit Q sera d'autant plus fort que L sera moindre et H plus grand, puisque $Q = H.L.(H - H_0)$.

Nous aurons à revenir plus tard sur cette notion.

Observations générales sur l'application des formules. — Nous ne prétendons pas que les choses se passent comme nous venons de le dire, mais cette étude peut servir à nous rendre mieux compte du phénomène réel.

Jusqu'ici nous avons supposé tous les cailloux de mêmes dimensions, ou au moins caractérisés par la même valeur de ρ. Dans le cas où des matériaux de toutes grosseurs se trouveraient mêlés, comment les choses se passeront-elles? Nous répondrons au moyen de notre formule:

$$tg\alpha \leqq tg\varphi = \frac{1000\,Hi}{K(d-1)\rho}.$$

Il n'y a pas d'inconvénient à considérer l'angle α comme sensiblement constant, quelle que soit la grosseur des cailloux. Admettons également, ce qui doit être à peu près exact, qu'on puisse, pour tous les cailloux d'une certaine grosseur, trouver une certaine moyenne de K, qui ne variera pas sensiblement pour les diverses grosseurs.

Nous avons dit que les matériaux soumis à l'action d'un courant sont dans la même situation que s'ils étaient, dans l'eau calme, sur un talus d'angle φ. Ils tendront donc à marcher d'autant plus vite que cet angle φ, ou plutôt que l'excédant de φ sur α, est plus fort. Il en résulte, d'après la formule, que le mouvement tendra à être le plus rapide pour les matériaux les plus légers et les plus petits, $(d-1)$ et ρ étant en dénominateur dans la valeur de φ.

Si l'on voulait tenir compte de l'influence de la forme des cailloux, on pourrait remarquer que, pour les pierres

d'un volume donné, $K\rho^3 = V$, on aura $K\rho = \frac{V}{\rho_2} = nV$. Par conséquent, le minimum du produit $K\rho$, qui entre en dénominateur, a lieu avec le minimum de n, lequel correspond évidemment à une forme sphérique. Les cailloux ronds seront donc les plus facilement entraînés.

Description sommaire du mouvement réel des cailloux. — D'après cela, les cailloux les plus petits atteindront dans leur marche les cailloux les plus gros et les choqueront; quelques-uns passeront dans les vides, mais la plupart rebondiront sous le choc et s'élèveront dans le courant pour retomber, un peu plus loin, au-dessus des cailloux qui les précédaient. Il en résulte un triage, sinon complet au moins partiel, des matériaux suivant leur grosseur. Les plus petits seuls sont à la surface de la couche en mouvement, et, d'après ce qui a été dit, marcheront plus vite en raison de leur position et de leurs dimensions.

En dessous, on rencontrera des cailloux de plus en plus gros, mélangés en proportion de plus en plus restreinte de cailloux moins gros et marchant avec une vitesse décroissante jusqu'à la couche qui restera immobile.

Ce mouvement, pour reprendre, en la généralisant, une comparaison qui nous a déjà servi, peut être assimilé à celui qui se produirait sur un talus indéfini le long duquel couleraient, d'une manière continue, des pierres de diverses dimensions, plates ou rondes, et de toutes formes intermédiaires. Si l'angle du talus est limite pour les pierres plates, il sera bien supérieur à la limite pour les pierres rondes. Ces dernières descendront bien plus vite, choquant les autres et roulant par-dessus, mais leur communiquant une partie de leur mouvement. On doit retrouver dans le mouvement d'entraînement sous l'eau toutes les perturbations, toutes les inégalités du mouvement sur le talus. En particulier, si le talus, à l'origine, présente des pentes variables, on verra le mouvement, plus violent sur les

pentes les plus fortes, se communiquer aux couches inférieures ; au contraire, sur les pentes les plus douces, le mouvement se ralentira, et une partie des matériaux, les plus plats notamment, s'arrêteront, en sorte que la pente tendra à s'uniformiser d'elle-même.

Dans cette comparaison, les pierres, rondes ou plates, du talus, représentent celles qui, dans le courant, sont plus ou moins facilement entraînées, et la pente du talus correspond à l'intensité générale de la force d'entraînement. Et l'on peut conclure par analogie, que dans un lit affouillable, en dehors du mouvement d'ensemble assez calme, avec triage partiel, il y aura des chocs tumultueux, des pierres qui rebondiront. De plus, si le lit présente des formes telles qu'au moment de la crue il y ait des régions où les conditions d'écoulement exigent des variations dans l'intensité de la force d'entraînement, ces variations disparaîtront spontanément par un remaniement du fond. Ainsi, si le lit présente, sur un point, un agrandissement de section, les lois de l'écoulement exigent que la pente et, par suite, la force d'entraînement diminuent; il y aura donc dépôt sur le fond des plus gros matériaux en mouvement jusqu'à ce que la diminution de profondeur, corrigée par une augmentation plus grande de la pente, ait rétabli l'équilibre.

L'effet inverse se produira dans une section rétrécie.

Pour vérifier cette théorie, on ne peut pas voir, malheureusement, ce qui se passe au fond du lit, comme on voit glisser sur un talus les matériaux déchargés d'un wagonnet; mais on peut très-bien entendre, pendant les crues, le mouvement des galets qui produit un bruissement bien caractérisé et entremêlé de coups irrégulièrement répétés, dus aux mouvements tumultueux des gros matériaux.

Il y a lieu de faire une remarque sur les galets qui bondissent à la suite d'un choc. Sur le talus, dans l'air, leur mouvement ascensionnel est arrêté par la pesanteur, qui est proportionnelle à leur densité. Dans l'eau, cette pesan-

teur est diminuée de la densité du liquide ambiant, et réduite moyennement aux 3/5 de sa valeur, quoique la force vive, au moment du choc, reste du même ordre dans les deux cas. Il en résulte que les galets peuvent monter bien plus haut. Il est vrai que la résistance de l'eau agit en sens inverse ; mais elle est probablement bien diminuée, en certains cas, par l'action de courants obliques ou verticaux qui peuvent favoriser l'ascension.

M. Dupuit, dans son étude sur le mouvement des eaux, explique certains phénomènes de transport par la force de suspension de l'eau agitée. Cette force est-elle bien capable de produire les effets qu'il lui attribue? La théorie que nous venons d'exposer complète utilement, ce nous semble, celle de M. Dupuit, pour expliquer les transports sur les rives ou par-dessus les digues de galets souvent fort gros.

Résumé. — Résumons l'étude que nous venons de faire.

La force d'entraînement est proportionnelle à la pente de surface et à la profondeur du courant.

La masse des matériaux entraînés sera d'autant plus grande qu'ils seront de plus petites dimensions.

L'épaisseur de la couche en mouvement sera, en tout cas, proportionnelle à la force d'entraînement.

La force d'entraînement a pour effet de placer les matériaux du fond dans les mêmes conditions que s'ils étaient sur un plan plus ou moins incliné. Les petits graviers marchent plus vite que les gros et occupent principalement la partie supérieure de la couche en mouvement.

Si la force d'entraînement diminue, les plus gros matétériaux, formant la couche inférieure, s'arrêtent les premiers.

Le fond du lit se dispose naturellement, de manière que la force d'entraînement soit constante quand on passe d'une section à une autre.

Observation. — Nous terminerons cette étude par une observation importante.

Nous avons dû supposer, pour étudier la force d'entraînement, que le régime était uniforme, et tous nos raisonnements ont été basés sur cette hypothèse.

Cette condition, sans être absolument remplie, se trouvera à peu près réalisée quand la largeur du lit variera peu. En effet, nous avons vu plus haut, que le débit de matière, qui doit être constant dans toutes les sections pour que le fond soit en équilibre, a pour valeur :

$$Q = \chi(1000\,i)^2 \int_0^L H(H - H_0)\,dx = \overline{1000}^2\, \chi \cdot H^2 i^2 \left(1 - \frac{H_0}{H}\right) L,$$

ou bien, si H_0 est suffisamment petit par rapport à H :

$$Q = \overline{1000}^2\, \chi H^2 i^2 L,$$

d'où l'on tire :

$$\sqrt{Hi} = \frac{\text{const.}}{\sqrt[4]{L}};$$

or, la quantité $\sqrt{Hi}$ est, toutes choses égales d'ailleurs, sensiblement proportionnelle à la vitesse moyenne du courant. Cette vitesse moyenne ne variera donc que comme l'inverse de $\sqrt[4]{L}$.

Aussi, dans les lits réguliers, nous pourrons sans inconvénient, prendre toujours pour valeur de la force d'entraînement, l'expression :

$$1000\,Hi.$$

Après avoir étudié la force d'entraînement, en elle-même et dans ses effets, nous avons maintenant à appliquer ces principes en recherchant comment elle tend à varier suivant la forme des berges, leur courbure, leur direction, leur hauteur. Nous en conclurons ensuite les formes d'équilibre que le fond doit prendre suivant les diverses circonstances.

III.

Action des berges sur le fond pour un débit constant.

Dans ce qui va suivre, nous considérerons les rives comme inattaquables et le fond comme indéfiniment affouillable. Mais, avant d'étudier les mouvements du fond, nous devons rechercher quelles sont les tendances du courant, en supposant, pour un instant, le fond inattaquable.

Variation de la force d'entraînement dans un lit fixe. — Considérons un lit de pente et de profondeur constantes, où s'établit un régime uniforme, et voyons quelle est l'action des rives.

Lit rectiligne. — Une rive droite et parallèle à la direction du courant aura une action très-faible, provenant uniquement des irrégularités du courant, qui peut, sur certains points, se porter un peu obliquement contre la berge. Mais en général la pente, le long de la rive, sera la pente générale du lit, et la ligne d'eau, dans le profil en travers, sera sensiblement horizontale.

Action des angles. — Une rive composée de deux droites formant un angle concave vers le courant ABC (*fig.* 2) se comportera, dans les parties éloignées de l'angle, comme une rive droite. Mais près du sommet de l'angle que se passera-t-il ?

Les filets voisins de la rive venant de A seront partiellement arrêtés en arrivant vers B, tandis que, plus au large, vers B′, les filets seront déviés doucement par ceux qui couleront le long de BC et réagiront sur ces derniers de manière à augmenter la pression piézométrique près de la rive BC. Nous aurons donc, près de la rive, un profil en long tel que le présente la *fig.* 2, avec exhaussement en B sur le profil moyen, exhaussement qui se retrouve sur le profil en travers *bb′b″*.

Dans les cas ordinaires, la variation de pente sera forte aux environs de B et la variation de profondeur assez faible. Par suite, la force d'entraînement *tendra* à diminuer en amont, à augmenter en aval de B.

Un raisonnement semblable montrerait qu'il se produira un effet inverse si l'angle est convexe du côté du courant, comme en B″.

Nous ne préciserons pas davantage ce cas, peu utile en pratique.

Action d'une courbe circulaire indéfinie ; dévers d'eau. — Si la rive a une coubure circulaire continue, concave vers le lit, tous les filets ayant à se mouvoir sur des trajectoires circulaires développeront une pression centrifuge contre la rive; d'où, augmentation de pression piézométrique dans le voisinage, accusée par un relèvement de la surface liquide dans le profil en travers. Mais, vu l'importance de ce phénomène, nous allons l'étudier en détail.

Soit *a*AB*b* (*fig.* 3) un profil en travers du lit dont les deux rives sont circulaires, ou, pour parler plus exactement, cylindriques, l'axe commun de ces deux cylindres étant *o*O. D'après ce que nous avons dit, la ligne de l'eau ira en s'élevant de *b* en *a*. Considérons la tranche d'eau comprise entre deux surfaces cylindriques très-voisines dont les traces, sur le plan du profil, sont Mμm et Nνn, et limitée à deux plans verticaux, passant par l'axe *o*O, qui coupent, sur la rive B, une longueur B′B″ = 1 mètre.

Désignons NB par x,
MN par dx,
Nν par H,
νn par z,
ON par R,
AB par L,

et soit i la pente par mètre sur la tranche Nn et u la vitesse moyenne des filets; les mêmes lettres, avec les indices 0 et 1, désignant les mêmes quantités pour les rives B et A.

Nous voulons calculer l'excès piézométrique Z de B en A produit par la force centrifuge dans la section A'B'B"A".

La force centrifuge de la tranche $MmnN$ est égale à $\frac{Mu^2}{R}$, M étant la masse de la tranche; or, la densité étant égale à l'unité, on a :

$$M = \frac{(H + z) \times N'N''dx}{g}.$$

Cette force transmet une pression sur la surface M'M", surface finie qui ne diffère de N'N" que d'un infiniment petit.

La pression sur l'unité de surface est donc :

$$\frac{u^2 dx}{gR},$$

et elle doit être équilibrée par l'accroissement piézométrique dz. On a donc l'équation :

$$dz = \frac{u^2 dx}{gR}.$$

Telle est l'équation différentielle de la courbe ba rapportée à l'horizontale $b\alpha$. Comme z est toujours petit par rapport à H, nous pouvons écrire : $u^2 = \frac{Hi}{b}$, b étant un coefficient fonction de H qui, d'après les expériences de M. Bazin, est de la forme $\alpha\left(1 + \frac{\beta}{H}\right)$. L'équation prend alors la forme :

$$dz = \frac{Hidx}{gRb} = \frac{H^2 idx}{gR\alpha(H + \beta)}.$$

Or, on a évidemment :

$$R = R_0 + x,$$

$$i = i_0 \frac{R}{R_0} = i_0 \frac{R_0 + x}{R_0},$$

et alors on peut écrire :

$$dz = \frac{H^2 i_0 dx}{g R_0 \alpha (H + \beta)}.$$

Cette équation pourra être intégrée si l'on donne la forme du fond qui permettra d'exprimer H en fonction de x.

En particulier, si l'on suppose que la ligne de fond AB soit horizontale, H est constant et l'on a :

$$z = \frac{H^2 i_0}{g R_0 \alpha (H_0 + \beta)} \cdot x,$$

et, en a, contre la rive concave :

$$Z = \frac{H^2 L i_0}{g R_0 \alpha (H + \beta)} = \frac{\Omega i_0}{g R_0 b} \quad (\Omega = HL).$$

La surélévation totale ou *dévers d'eau* est donc, dans ce cas, proportionnelle à la section d'eau, à la pente et à la courbure, et inversement proportionnelle au coefficient d'écoulement b.

Si la ligne de fond, AB, est droite, mais inclinée, de telle sorte que l'on ait :

$$H = H_0 + px,$$

on peut faire l'intégration en changeant de variable et en remarquant que $dx = \frac{dH}{p}$. On a donc :

$$dz = \frac{i_0}{g R_0 p \alpha} \cdot \frac{H^2}{H + \beta} dH,$$

d'où l'on peut tirer :

$$z = \frac{i_0}{g R_0 p \alpha} \left(\frac{H^2 - H_0^2}{2} - \beta (H - H_0) + \beta Lg \frac{H + \beta}{H_0 + \beta} \right).$$

En particulier, si l'on suppose que $H_0 = 0$, on peut écrire, comme expression du dévers d'eau total :

$$Z' = \frac{i_0}{g R_0 p \alpha} \left(\frac{H_1^2}{2} - \beta H_1 + \beta^2 Lg \frac{H_1 + \beta}{\beta} \right);$$

mais on peut, en introduisant la profondeur moyenne H′, poser :

$$p = \frac{2H'}{L} \text{ et } H_1 = 2H',$$

et l'on voit facilement que Z′ peut s'écrire :

$$Z' = \frac{\Omega i_0}{g R_0 b'} \left\{ 1 + \frac{\beta^2}{H'^2} \left[Lg \left(1 + \frac{2H'}{\beta}\right)^{\frac{1}{2}\left(1+\frac{\beta}{H}\right)} - 1 \right] \right\},$$

b' étant la valeur de b correspondante à $H = H'$.

On peut, en discutant l'expression entre crochets, reconnaître que la valeur de Z′ est égale à la valeur de Z, trouvée plus haut, multipliée par une quantité peu supérieure à l'unité. En admettant pour β la plus grande valeur donnée par M. Bazin, 1,25, on trouve que les termes entre crochets ont les valeurs suivantes :

Pour $H = 1^m,25$. . . . . 1,10 environ.
$H = 4^m,75$. 1,033

Cette dernière remarque autorise, sans entrer dans une discussion analytique complète, à admettre notre formule primitive :

$$Z = \frac{\Omega i_0}{g R_0 b},$$

comme suffisamment exacte dans la pratique, quelle que soit la forme du lit.

Formation de courants obliques dans un lit circulaire. — Si l'on se reporte à la discussion de cette formule, on voit que nous l'avons établie en admettant que tous les filets de la tranche M*mn*N étaient animés de la même vitesse moyenne *u*. On sait que cela n'est pas exact, les vitesses, près de la surface, étant toujours supérieures aux vitesses près du fond. Pour être rigoureux, nous aurions dû écrire : Σmv^2, au lieu de : Mu^2, ce qui aurait conduit à augmenter Z. Mais ce n'est pas là-dessus que nous voulons insister.

Nous avons dit que la force centrifuge de la tranche M*mn*N produisait une pression répartie sur la surface M*m* et contrebalancée par l'accroissement piézométrique dz. Mais, du moment que les vitesses des filets supérieurs sont plus grandes que celles des filets inférieurs, cette pression n'est pas uniformément répartie, et la surface M*m* ne peut être en équilibre. Les filets plus rapides pressant davantage doivent refouler la tranche d'eau suivante en se rapprochant de la rive concave, tandis que les filets inférieurs, moins rapides et produisant une pression inférieure à la moyenne, doivent, à leur tour, se laisser repousser par les filets de la tranche suivante.

En conséquence, on aura, à la surface, un courant dirigé obliquement vers la concavité, et, dans le fond, un courant inverse, dirigé vers la rive convexe, et les matériaux entraînés au fond du lit devront participer à ce dernier mouvement. Cette considération est fort importante pour expliquer les approfondissements que l'on constate près des rives concaves.

Raccordement d'une droite et d'un arc de cercle. — Examinons maintenant, ce qui va se passer dans un lit à section rectangulaire constante et à pente uniforme, et dont l'axe se compose d'un arc de cercle BCD suffisamment long entre deux alignements droits AB et DE supposés indéfinis (*fig.* 4).

Un profil en travers en A ou en E sera déterminé d'après la pente et le débit, et la surface de l'eau A_0A_1 sera horizontale. Un profil en travers levé en C, au milieu de la courbe, accusera un dévers d'eau que nous savons déterminer. La nouvelle ligne d'eau rapportée sur le même profil que A_0A_1 sera C_0C_1, et l'on aura approximativement : $C_1A_1 = A_0C_0$, car la section d'eau doit être sensiblement constante.

Dès lors, si nous traçons le profil en long sur l'axe et près des deux rives, en négligeant la différence de longueur

des deux rives dans la partie courbe, nous voyons que le profil sur l'axe est une ligne droite ACE, comme si le lit était entièrement rectiligne; le profil près des rives doit se confondre avec le profil sur l'axe vers les extrémités en amont de B et en aval de D. Aux environs du profil C, la ligne d'eau, sur la rive concave, est une parallèle au profil sur l'axe menée par le point C_1 au-dessus de C, tel que $C_1C = C_1A_1$ du profil en travers; et sur l'autre rive, une parallèle menée par C_0 au-dessous de C, telle que $C_0C = C_0A_0$ du profil en travers.

Ces deux lignes doivent se raccorder à la ligne de l'axe, aux environs des points B et D, savoir : la ligne concave, par une diminution de pente en B et une augmentation en D, et la ligne convexe, par une augmentation en B et une diminution en D.

Il y aura donc, tout le long de la rive concave, augmentation de profondeur, et par suite, une certaine augmentation de la force d'entraînement; mais en B_1 diminution, en D_1 augmentation considérable de pente et de force d'entraînement.

Les résultats sont inverses sur la rive convexe.

Mais, remarquons-le bien, si la courbe était trop réduite, la dénivellation en travers C_1C_0 pourrait ne pas se produire complétement.

Raccordement entre deux courbes circulaires opposées. — Un raisonnement tout semblable nous permettra de construire les profils en long et en travers dans les cas où, à la suite de la courbe BCD, le lit présenterait une contre-courbe DEF (*fig.* 5). La ligne d'eau E_1E_0 présentera un dévers en sens inverse du profil C_1C_0, et, dans le profil en long, à partir de la normale C, on aura, en D, des variations de pente sur les rives analogues, mais plus fortes que dans le cas précédent.

Ainsi les tracés courbes présentent deux causes de variations dans la force d'entraînement : la 1re est la courbure

elle-même et les variations de profondeur qui en résultent; la 2e est le raccordement des courbures qui produit, sur chaque rive, des variations dans la pente.

Raccordement entre deux courbes circulaires de même sens. — Enfin, si la courbure de DEF était de même sens, mais plus petite ou plus grande qu'en BCD, on obtiendrait des profils en long tels que ceux figurés aux *fig.* 6 et 7.

Dans le premier cas, l'action du raccordement en D est de même sens, mais plus faible que ci-dessus; dans le second elle est en sens inverse, c'est-à-dire de même sens qu'en B.

Tracés à courbure continue. — Le dernier cas que nous venons d'indiquer conduit naturellement à étudier un nouveau genre de tracé dans lequel la courbure des rives variera d'une manière continue, augmentant d'abord de zéro jusqu'à un certain maximum, pour décroître ensuite et ne changer de sens qu'en repassant par zéro. La *fig.* 8 indique ce qui se passe alors. On commettrait sans doute une erreur en calculant le dévers d'eau en chaque point, d'après la courbure locale; il convient plutôt de prendre la courbure moyenne sur une certaine longueur; ainsi, au sommet C de la courbe continue BCD, le dévers d'eau C_1C_0 sera plus faible que si la courbure du point C se prolongeait sur une certaine longueur; cependant, comme aux environs du sommet la courbure varie peu, quelle que soit la définition géométrique de la courbe, et que d'ailleurs la formule que nous avons établie donne des valeurs peut-être un peu trop faibles du dévers d'eau, ainsi que nous l'avons indiqué, nous pensons qu'on pourra encore, sans inconvénient, s'en servir pour calculer le dévers maximum C_0C_1. Mais, à partir du profil C, il doit aller en diminuant progressivement dans les deux sens, jusqu'à devenir nul en B et en D. Ainsi, l'action du raccordement qui, dans les courbes circulaires, se faisait sentir brusquement aux environs de ces points, s'adoucit et se propage dans tout l'es-

pace compris entre l'inflexion et le sommet de la courbe; elle est donc régularisée et, en même temps, atténuée.

Influence de la largeur. — Dans tout ce qui précède, nous avons supposé la largeur du lit constante et la hauteur des berges supérieure au niveau de l'eau. Il est bien évident que tout accroissement de section tend à produire une diminution de la pente et de la force d'entraînement, et toute diminution de section une augmentation de la pente et de la force d'entraînement.

Influence de la hauteur des berges, quand elles sont submersibles. — Quant à la hauteur des berges, nous devons en étudier l'action avec soin.

Considérons un lit dont le profil en travers soit MNPQRSTV (*fig.* 9), PQ et RS formant deux berges submersibles, et MN et VT limitant un cours de crues plus large que le lit mineur PQRS.

Si la nature et la forme du terrain du lit de crue sont telles que les filets liquides supérieurs tendent à prendre, sous leur action, des vitesses parallèles à celles que le lit mineur impose aux filets du fond, en particulier si les berges du lit de crue et du lit mineur sont droites et parallèles, l'action d'une crue, atteignant le niveau MV, se réduira à accroître la force d'entraînement sur le fond QR proportionnellement à sa hauteur. La même crue, supposée renfermée entre les berges QPM'RSV' rendues insubmersibles, agirait de la même manière, mais s'élevant à un niveau M'V' supérieur à MV, produirait, sur le fond, une action plus énergique. Mais il en est rarement ainsi, et la direction imprimée aux filets supérieurs par le lit de crue ne concorde pas avec le tracé du lit mineur.

Nous ne pouvons plus songer ici à faire une théorie complète qui ne pourrait être basée que sur la connaissance des lois de la viscosité. Mais on peut facilement déterminer dans quel sens se fera sentir l'action du lit de crue sur le lit mineur.

Considérons, pour fixer les idées, un lit de crue compris entre deux berges rectilignes et parallèles et un lit mineur sinueux inscrit dans ce lit de crue (*fig.* 10).

On peut dire tout d'abord, comme plus haut, que, pour une crue d'un débit donné, l'intensité absolue de la force d'entraînement est, en moyenne, moindre que si l'endiguement du lit mineur était insubmersible. Désignons par *force normale* d'entraînement cette force moyenne qui existera partout où la direction des filets du lit mineur est parallèle à celle des filets supérieurs, par exemple (*fig.* 10) en B, aux environs de E et de G. Comment se modifie-t-elle dans les parties du lit mineur obliques au lit de crue, en M_0 et M_1 par exemple? Une molécule profonde M_1, sous l'action de la berge C_1D_1, tend à suivre une direction parallèle à cette berge; mais les molécules supérieures, qui suivent une direction parallèle au lit de crue, réagissent par frottement ou viscosité sur la molécule profonde M_1 et tendent à augmenter sa pression contre la rive. Cette action est la même que nous avons vue produite par la force centrifuge dans une concavité.

De même, une molécule profonde M_0, située près de la rive C_0D_0, sera éloignée de la rive par les filets supérieurs.

Ainsi, un courant de crue, coupant sous un certain angle la berge du lit mineur, modifiera l'action de cette berge comme le ferait un changement dans sa courbure, ce changement étant d'autant plus grand que l'angle d'obliquité est plus fort. La berge agit comme si elle devenait plus concave quand le courant de crue la coupe en allant de l'intérieur à l'extérieur du lit mineur, et comme si elle devenait plus convexe quand le courant de crue la coupe en allant de l'extérieur à l'intérieur du lit mineur.

En résumé, quand le lit mineur est submergé, le courant de crue agit comme s'il déplaçait les points de raccordement des courbures inverses, et tend, par conséquent, à diminuer l'influence des raccordements brusques de cour-

bures que nous avons signalée en étudiant les berges insubmersibles.

Manière dont l'équilibre du fond peut s'établir sous ces diverses actions. — Après avoir établi comment *tend* à varier la force d'entraînement suivant la forme des rives, en supposant que le fond reste fixe, nous avons à voir maintenant comment le fond doit se modifier pour qu'il s'établisse, entre les profondeurs et les pentes de surface, les relations nécessaires à l'équilibre, c'est-à-dire nécessaires pour que le courant entraîne, dans toutes les sections successives, la même quantité de matières.

Dans une courbe circulaire. — Voyons d'abord la modification que va subir le profil en travers du fond d'un canal rectangulaire à courbure constante indéfinie aABb (*fig.* 11). L'eau, devant se saturer de matière, mettra en mouvement, du côté concave A, une couche plus épaisse que du côté convexe B, en raison de l'excès de profondeur Aa sur Bb. Mais, d'après la remarque que nous avons faite, les matières entraînées aux environs de A suivront une trajectoire oblique les ramenant vers la rive convexe. De ce côté, la puissance d'entraînement étant moindre, le courant devra en déposer une partie, et le fond fixe se disposera suivant une forme AmnB. Dans ce nouvel état, la différence de la force d'entraînement entre les deux rives est encore augmentée; l'épaisseur de la couche en mouvement augmentera en A et diminuera en B, et le même effet se produisant toujours, il y aura encore creusement en A et dépôt en B, jusqu'à ce que le lit ait atteint une forme AMNB pour laquelle le talus de M en N aura une inclinaison suffisante pour que la tendance au déplacement latéral y soit neutralisée par l'action de la pesanteur.

Si la largeur du lit était trop grande relativement à la profondeur moyenne et au débit, les choses pourraient se passer un peu autrement; la force d'entraînement serait trop faible pour porter latéralement, jusqu'à la rive con-

vexe, les matériaux détachés du fond près de la rive concave. Alors le dépôt de matières se fera vers le milieu du lit et le thalweg sera double. Il y aura un thalweg principal contre la rive concave et un thalweg secondaire près de la rive convexe, séparés par un renflement du fond, et le profil en travers sera tel que $AMNN_1B$ (*fig.* 12).

Mais, dans ce qui suit, nous admettons, sauf indication contraire, que la largeur est assez faible pour qu'on soit dans le cas de la *fig.* 11.

Dans cet état d'équilibre, la section d'eau doit rester sensiblement constante, car, si d'une part la profondeur augmente (ce qui, avec une pente donnée, tend à rendre l'écoulement plus facile d'après les lois ordinairement admises), d'autre part, le mouvement d'une masse plus considérable de graviers dans la partie profonde doit y contrarier l'écoulement en absorbant une partie de la force vive.

Primitivement, quand le fond était horizontal et la profondeur moyenne H, la force d'entraînement totale dans toute la largeur L de la section était égale à $1.000Hi \times L = 1.000i\Omega$. Après la déformation du fond, on peut encore ramener l'expression de cette force à la même forme; et comme Ω, d'après ce que nous avons dit, ne change pas, la force totale d'entraînement du courant reste la même.

Néanmoins la quantité de matière passant dans un temps donné est augmentée, car, l'épaisseur de la couche en mouvement étant plus forte, les matériaux supérieurs doivent marcher plus vite. On peut s'en rendre compte en cherchant le lit équivalent d'après la formule que nous avons donnée plus haut.

Désignons par H_m la profondeur moyenne au milieu du lit et par x la distance horizontale d'un point quelconque de la section au milieu. On pourra poser :

$$H = H_m + \varphi(x),$$

φ étant une fonction telle que $\varphi(0) = 0$ et $\varphi(-x) = -\varphi(x)$.

Dès lors les équations du lit équivalent seront :

$$H.L = \mathrm{H}_m \mathrm{L}.$$

$$H.L(H - \mathrm{H}_0) = \int_{-\frac{\mathrm{L}}{2}}^{+\frac{\mathrm{L}}{2}} dx \{[\mathrm{H}_m + \varphi(x)]^2 - \mathrm{H}_0[\mathrm{H}_m + \varphi(x)]\},$$

ou bien :

$$H = \mathrm{H}_0 + \frac{1}{\mathrm{H}_m \mathrm{L}} \int_{-\frac{\mathrm{L}}{2}}^{+\frac{\mathrm{L}}{2}} \varphi^2(x)\,dx + \mathrm{H}_m(\mathrm{H}_m - \mathrm{H}_0)\,dx + $$
$$+ (2\mathrm{H}_m - \mathrm{H}_0)\varphi(x)\,dx.$$

Sous cette forme, on voit que l'intégrale se divise en trois parties : $\int \varphi^2(x)\,dx$ qui est essentiellement positive, et s'ajoute à la seconde : $\int \mathrm{H}_m(\mathrm{H}_m - \mathrm{H}_0)\,dx$, qui donnerait, à elle seule, $H = \mathrm{H}_m$; enfin $\int \varphi(x)\,dx$, qui, entre deux limites égales et de signe contraire, est nécessairement nulle, du moment que $\varphi(-x) = -\varphi(x)$.

Par conséquent, on a : $H > \mathrm{H}_m$, ou exactement :

$$H = \mathrm{H}_m + \frac{1}{\mathrm{H}_m \mathrm{L}} \int_{-\frac{\mathrm{L}}{2}}^{+\frac{\mathrm{L}}{2}} \varphi^2(x)\,dx.$$

Si l'on suppose maintenant que le débit augmente de telle sorte que le niveau passe de *ab* en *a'b'* (*fig.* 11), le nouveau dévers d'eau sera plus grand que le premier et les actions latérales plus intenses, en sorte que le talus MN pourra se roidir.

La section *a*AM'N'B*b* peut bien être équivalente géométriquement à la section primitive *a*AMNB*b*; mais elle ne lui est pas équivalente au point de vue de l'écoulement, car elle est réduite dans la partie peu profonde où la vitesse des filets est plus faible, et elle est augmentée du côté de la plus grande profondeur où l'écoulement est plus rapide.

Il en résulte que si le débit qui avait produit *ab* se rétablit, il produira un niveau inférieur à *ab*, à moins que la pente ne se modifie ou que le talus primitif du fond ne se reforme.

Dans un raccordement entre deux courbes. — La déformation du fond du lit dans la partie courbe ne modifiera pas sensiblement le dévers d'eau, d'après la remarque faite plus haut. Toutes les variations dans les pentes de surface, et les variations correspondantes de la force d'entraînement tendront donc à subsister, aux environs des points de raccordement, telles qu'elles ressortent de l'étude ci-dessus, faite dans le cas d'un fond plat inaffouillable, et de la discussion détaillée que nous avons faite on doit conclure la loi générale suivante : Près d'une rive, toute diminution de concavité de l'amont à l'aval tend à produire une augmentation locale de pente et de force d'entraînement; toute augmentation de concavité tend à produire une diminution de pente et de force d'entraînement.

Les effets sont les mêmes ou s'accentuent davantage si les courbures changent de sens.

D'après cette remarque nous pouvons nous borner à étudier ici en détail le cas d'un lit composé de deux courbes circulaires indéfinies de sens contraire, raccordées par simple contact, ou bien raccordées par osculation au moyen d'une courbe intermédiaire à inflexion continue.

On pourra facilement appliquer le même mode de raisonnement à tout autre cas.

Admettons, tout d'abord, que le fleuve soit dans un état de débit constant.

Raccordement par simple contact. — Soient $C_0D_0E_0$, $C_1D_1E_1$ les deux rives, D_0D_1 étant la normale de l'inflexion (*fig.* 13).

Développons l'axe du lit CDE, pour construire un profil en long. Si le lit était rectiligne, le profil en long, sur une ligne quelconque parallèle à l'axe, serait pour le fond CDE et pour la surface *cde*. Mais, en raison des courbures

et du dévers d'eau qui en résulte, aux environs du profil C, la ligne de surface se relève du côté de la rive concave en c_1 et s'abaisse du côté opposé en c_0, et les lignes de fond correspondantes deviennent C_0 et C_1.

L'effet inverse se produit en E. En D_1, il y a un excès de force d'entraînement qui va, tout d'abord, produire en ce point un approfondissement, tandis qu'en D_0 il y aura plutôt un comblement.

Les eaux, qui suivaient la rive de C_0 en D_0, rencontrant cet obstacle, vont perdre de leur vitesse dans le sens de la rive et la pente diminuera encore, relevant le niveau de D_0 et forçant une partie des eaux à se diriger vers D_1.

Ces eaux de la rive convexe, peu chargées de matières, faciliteront encore l'approfondissement D_1, qui se prolongera un peu plus bas.

Mais les matières ainsi entraînées rencontreront bientôt celles qui viendront de la concavité D_0E_0 et se déposeront avec elles ; ce dépôt, formant obstacle, arrêtera le courant dans le sens D_1E_1 et le forcera à se dévier pour se rapprocher de la concavité E_0.

On peut, d'après ces indications générales, tracer le profil en long de surface et de fond sur les deux rives (*fig.* 13).

En d_1, surélévation et diminution de pente correspondant à l'approfondissement D_1 ; en aval de d_1 jusqu'en h_1, augmentation de pente possible, grâce au relèvement du talus D_1H_1 ; de h_1 en e_1, pente peut-être inférieure à la pente moyenne en raison de la pente de fond H_1E_1.

Sur l'autre rive, inflexion régulière et très allongée de c_0 en e_0, le talus étant possible à cause de la diminution de pente de surface.

En aval de D, la surélévation anormale de d_1 en f favorisera le passage oblique du courant d'une rive à l'autre. Dans ce passage oblique la section normale au courant sera plus large que la section normale à l'axe du lit, le fond devra être plus élevé que sur le thalweg en amont et

en aval, et la pente y être supérieure à la pente moyenne pour rétablir l'équilibre dans la force d'entraînement.

Il y aura donc en aval de l'inflexion D, un haut-fond F, sur lequel la pente sera supérieure à la pente générale, tandis qu'en D, la pente sera inférieure à la pente générale ; comme le montre le profil en long sur le thalweg. C'est, en réalité, le seuil F, qui résulte des conditions d'équilibre de la force d'entraînement, qui règle la surélévation de la surface en d.

Dans le plan de la *fig.* 13, la forme du fond est figurée au moyen de courbes d'égales profondeur. Celles qui sont en dessous du plan moyen CDE sont hachées.

Courbes raccordées par osculation. — Si, entre les profils C et E (*fig.* 14) il existe un raccordement par osculation, l'action brusque du changement de courbure est supprimée et remplacée par une action continue qui tend, nous l'avons vu, à réduire le dévers d'eau progressivement en augmentant la pente et, par suite, la force d'entraînement en $C_1D_1E_1$, et à réduire la pente en $C_0D_0E_0$.

L'équilibre doit se rétablir par un petit excès d'approfondissement de C_1 en aval de D_1, suivi d'un relèvement en talus plus raide que le talus qui serait produit de D_1 en E_1, par l'accroissement progressif de la courbure, et qui aura pour conséquence de gonfler les eaux en d_1 et de reporter plus en aval le raccordement de la ligne de surface avec la ligne normale e_1. Sur l'autre rive l'effet inverse produit un relèvement de la ligne d'eau c_0d_0, et le raccordement s'achève en aval de d_0 par une diminution de pente correspondant au talus incliné du fond, en sorte que, de ce côté, le raccordement avec la ligne normale e_0 est reporté un peu à l'amont.

D'après cela, on est conduit à représenter le lit par le plan et le profil en long de la *fig.* 14, et le profil en long sur le thalweg présente encore, à la surface, une diminution sur la pente normale de C en D et une augmentation

à l'aval de D, et, au fond, un relèvement en F, en aval de l'inflexion géométrique. Mais toutes ces variations sont plus douces et rachetées sur de plus grandes longueurs que dans le cas précédent.

De plus, les courants en plan doivent être beaucoup moins obliques sur l'axe général du lit.

Courbes de même sens raccordées par une surflexion. — Encore un mot, sur un cas intéressant au point de vue pratique, celui de la surflexion, ou raccordement de deux courbes de même sens par un alignement droit assez court ou par une courbe osculatrice, présentant, en un de ses points, une surflexion, ou contact de troisième ordre avec sa tangente.

Pour abréger, nous ne traiterons que cette dernière forme de la surflexion (*fig*. 15).

Dans ce cas le profil en long de surface sur les deux rives tend à être tangent à la ligne du profil moyen au point d'inflexion D. Il doit y avoir un affouillement en amont de D_1 et relèvement correspondant du plan d'eau nécessitant un dépôt en aval, dépôt qui est encore favorisé par la réduction de pente de D_1 en E_1.

Tout se passe d'une manière exactement inverse sur l'autre rive. En aval de D_0 l'augmentation de pente doit provoquer un creusement, en sorte que le profil en long aura la disposition de la *fig*. 15.

De plus, la dénivellation générale entre les deux rives provoquera des courants latéraux de D_1 en D_0, puisqu'il n'y a point là de réaction de courbure qui s'y oppose.

En résumé, les actions, dans ce cas, seront plus faibles, mais de même sens que s'il y avait, entre C et E, une double inflexion, D_0 étant le sommet de la concavité.

Si nous avions traité le cas du raccordement d'une courbe circulaire indéfinie et d'un alignement droit, nous aurions trouvé cette loi de l'approfondissement anormal près du point de raccordement de la rive convexe à la rive

rectiligne, et nous pourrions en déduire, pour le cas de la surflexion par raccordement brusque, un résultat analogue à celui que nous venons de trouver.

Effet d'un endiguement submersible. — Nous avons, jusqu'ici, supposé les digues insubmersibles; nous ne pouvons ajouter que peu de chose sur l'effet produit par un endiguement submersible.

Cet effet sera, dans son ensemble, moins intense que celui d'un endiguement insubmersible, car tout le débit d'eau qui s'écoule en dehors des digues reste sans action sur le fond. Il résultera, de plus, de la direction générale du courant de crue, une modification dans l'action des eaux de nature à modifier l'emplacement du seuil d'inflexion comme nous l'avons dit plus haut. Ce déplacement se fera vers l'aval dans les cas les plus ordinaires, c'est-à-dire dans les cas analogues à celui que nous avons représenté *fig.* 10.

Si la hauteur de l'endiguement est variable, les actions de creusement seront plus intenses dans les parties où les les digues seront plus élevées.

Ces effets peuvent être modifiés par l'existence de bras importants de décharge et par une foule de circonstances locales que l'on doit subir ou que l'on peut modifier dans une certaine mesure. Il est impossible de les examiner toutes dans une étude d'ensemble ; mais il y a lieu d'en tenir compte dans chaque cas particulier, en appliquant les principes généraux.

Après avoir étudié l'action de la courbure, des variations de la courbure et de la hauteur, en un mot de la forme des rives sur les perturbations du fond, et avoir appliqué ces principes à un lit dont la pente générale est donnée, dont la largeur est constante et dans lequel le débit est invariable, nous allons examiner comment l'équilibre du fond se modifie quand un changement vient à se produire dans les débits d'eau ou de matières.

IV.

Actions produites par un débit variable.

Moyens de rendre le chenal stable. — La crue d'un fleuve est alimentée par les crues simultanées ou successives de ses affluents, qui présentent en général les conditions de régime les plus diverses. Les uns seront des rivières à faibles pentes apportant beaucoup d'eau et peu de matériaux; les autres, au contraire, seront des torrents rapides apportant une forte proportion de pierres de toutes grosseurs.

Par suite, à tel moment déterminé, suivant la nature des affluents en crue, le lit du fleuve, pour un certain volume d'eau, recevra des quantités très-différentes de matières charriées.

Or, il est bien évident que pour que le lit du fleuve se maintienne, il faut qu'il y ait égalité entre le volume des matières reçu des affluents et le volume entraîné dans le courant du fleuve. Si les apports des affluents sont insuffisants, les eaux du fleuve achèveront de se saturer aux dépens du fond, jusqu'à ce que, la pente diminuant, la force d'entraînement soit suffisamment réduite.

Au contraire, si les affluents torrentiels donnent, ils apporteront plus de matières que ne pourra en transporter le fleuve. Dans ce cas, il y aura un remaniement inverse du fond tel que l'équilibre se rétablisse entre les apports et les matériaux entraînés.

D'après cela, on ne peut espérer obtenir un fond absolument invariable; mais, par suite des crues alternativement plus ou moins chargées de matières, l'état réel du fond oscillera autour d'un état moyen réglé par la fréquence

des crues des divers affluents suivant la situation hydrologique de leur bassin.

Cette instabilité du lit, en présence de diverses crues de même débit, se retrouvera, *à fortiori*, quand on considérera des crues de grandeurs variables, ou même, dans une seule crue, les états successifs du débit depuis le moment où les eaux commencent à monter jusqu'à celui où elles reviennent à leur niveau primitif.

Il est intéressant de rechercher les dispositions qui conviennent le mieux pour réduire les déformations du lit à leur moindre valeur, en conservant dans tous les états du fleuve, aussi constantes que possible, la position du thalweg en plan et la pente moyenne générale du fond et du plan d'eau.

Stabilité du thalweg en plan. — La question la plus facile est celle de la fixité du thalweg en plan. Après ce que nous avons dit de l'action des courbures, il est évident que, dans un lit courbe, le thalweg se fixera du côté de la rive concave. Un lit rectiligne ne présentera pas le même avantage; la position du thalweg y sera, en général, dans un état d'équilibre indifférent, et toute perturbation locale pourra le transporter d'une rive à l'autre. Tout courant oblique tendra à le fixer contre la rive qu'il va frapper. Si les rives sont submersibles, mais d'inégale hauteur, cette action sera plus intense contre la rive la plus élevée; ce sera donc de ce côté que viendra se fixer le courant, à moins que l'obliquité permanente des courants de crue ne tende à produire un effet inverse.

Dans les inflexions telles que nous les avons étudiées, la fixité du thalweg est encore satisfaisante; elle le sera d'autant plus que le courant de passage d'une rive à l'autre, sera moins oblique par rapport à l'axe du lit : car alors le lit, mesuré normalement au courant, étant moins large, ne permet pas des déplacements aussi étendus. Cela revient à

dire que le raccordement du type I (*fig.* 1) est plus stable que celui du type II.

A ce point de vue, les raccordements par osculation sont plus avantageux que les raccordements brusques par simple contact. Il suffit, pour s'en convaincre, de comparer nos *fig.* 13 et 14.

Stabilité du profil en long. — L'étude des profils en long va nous conduire à des conclusions analogues.

Si le lit est rectiligne et régulier, le profil en long pourra se composer d'une ligne de fond et d'une ligne de surface droites et parallèles, de pente constante. Toutefois, en un point quelconque, une surélévation du fond formée par un dépôt de matériaux suffisamment gros pourra subsister avec une augmentation de la pente de surface, dans de certaines limites. On n'a donc pas une stabilité complète du fond.

Mais si l'on suppose que la proportion de matériaux arrivant de l'amont vienne à varier, les résultats sont plus graves; il faut que la pente générale augmente ou diminue par un dépôt M'N ou un approfondissement M''N (*fig.* 16). Et ces perturbations s'appliqueront à un cube de matériaux d'autant plus grand que l'alignement droit sera plus long. Le régime sera donc profondément modifié.

Considérons, au contraire, le profil en long sur le thalweg produit dans un lit composé de courbes opposées.

Pour faciliter cette étude, nous pouvons substituer au lit courbe un lit rectiligne de largeur variable, dont chaque section rectangulaire sera l'équivalente de la section réelle d'après les formules :

$$HL = \int_0^L \mathrm{H}\,dx.$$

$$HL(H - \mathrm{H}_0) = \int_0^L \mathrm{H}(\mathrm{H} - \mathrm{H}_0)\,dx.$$

Bien entendu qu'au point de passage du courant d'une rive à l'autre, nous mesurerons le lit réel normalement au courant et non pas normalement aux rives.

Soit Q le débit de matières qui a formé le lit. On sait que l'on doit avoir, pour chaque section,

$$Q = \chi \overline{1000 i}^2 HL(H - H_0).$$

Si le débit de matière devient Q′ le lit devra se déformer de telle sorte que l'on ait encore :

$$Q' = \chi \overline{1000 i'}^2 H'L'(H' - H_0).$$

Les pentes i' pourront rester égales aux pentes primitives i si les sections restent les mêmes, c'est-à-dire si $H'L' = HL = \Omega$. Mais pour que ces conditions se réalisent il faudra que la forme du nouveau lit satisfasse à la relation :

$$\frac{H' - H_0}{Q'} = \frac{H - H_0}{Q} = m,$$

m étant un coefficient constant.

On en déduit :

$$H' = H_0 + mQ',$$

et, par suite,

$$L' = \frac{\Omega}{H_0 + mQ'}.$$

Ainsi, pour un débit d'eau déterminé, le débit de matières variant, la pente pourra se conserver, à la condition que les modifications du lit réel soient telles que la profondeur du lit équivalent varie dans le même sens, et la largeur en sens inverse du débit de matières.

Mais ces variations, nécessaires à la constance de la pente, sont-elles possibles? et se réaliseront-elles?

Dans un lit réel rectiligne nous ne voyons aucune tendance de nature à provoquer une variation de la forme du lit équivalent ; l'équilibre ne peut donc s'établir que par une variation de la pente, comme nous l'avons indiqué plus haut; mais dans un lit à inflexion il n'en est plus de même.

Supposons que, dans une courbe où le lit s'est réglé pour un débit de matières Q, arrive tout-à-coup un excédant de matière portant le débit à Q'. Il y aura tendance à un dépôt local, et, par suite, gonflement des eaux qui, trouvant une nouvelle puissance par là même, commenceront à retrousser les matières contre la rive convexe. Grâce à ce dépôt ainsi arrangé, la section se trouve rétrécie et l'écoulement de l'eau exige un relèvement du plan d'eau, à la suite duquel le lit équivalent sera rétréci et approfondi. Peu après le débit Q' passant dans la contre-courbe suivante y produira le même effet, et l'inflexion intermédiaire acquerra par là même l'excédant de profondeur nécessaire. Ainsi, un excédant de débit de matières tendra, au lieu de produire une augmentation de pente générale, à produire un relèvement général du plan d'eau. Le lit ne sera en somme modifié que d'une manière toute locale, et par un simple déplacement de matière d'une rive à l'autre l'état primitif sera reformé.

Nous ne voulons pas prétendre que les choses se passent exactement comme nous venons de le dire, et que, quel que soit le débit de matières, il sera toujours entraîné dans un lit à courbures opposées, sous modification de pente; mais, certainement, les modifications seront plus faibles et les perturbations du fond plus localisées que dans un lit rectiligne très-long.

Modifications produites, dans un lit à inflexion, par les variations du débit. — Nous avons maintenant à aborder une question très-importante. Comment va se modifier le lit formé par un débit déterminé, quand ce débit se modifie?

Si le débit augmente, nous ne croyons pas avoir rien à ajouter à ce que nous avons dit : le lit se trouve tout préparé à subir de nouvelles modifications dans le même sens, les anses concaves continueront à s'approfondir, et le relief des seuils aux inflexions sera d'autant plus prononcé.

Mais si le débit diminue et reprend sa valeur primitive,

le lit reprendra-t-il la forme correspondante, ou bien se modifiera-t-il d'une manière différente?

A l'étiage et par des eaux peu élevées, il n'y a plus, du moins sur le Rhône, de mouvements appréciables de graviers; tout au moins il n'y a plus de transports d'ensemble; mais seulement, dans certains cas, quelques déplacements locaux, et bientôt suspendus si les basses eaux durent quelque temps.

Le lit d'étiage se forme donc, pendant les crues, de la manière suivante :

Au moment du maximum de la crue le lit prend une certaine forme sous l'action des causes que nous venons d'étudier. Puis, pendant que les eaux baissent, il se produit un travail de remaniement qui tend à chaque instant à mettre le lit en rapport avec les nouvelles conditions du débit d'eau et du débit de matières. On conçoit, d'après cela, que le résultat pourra être différent, suivant la plus ou moins grande rapidité et toutes les autres circonstances de la décrue.

Mais, quoi qu'il en soit, bientôt un moment arrive où le transport général de matières doit devenir nul, le débit de matières cessant dans les affluents et les conditions du débit d'eau dans le fleuve lui-même ne permettant plus un mouvement d'entraînement général.

A ce moment le lit est à peu près fixé, mais, par suite de sa conformation, il présente à l'écoulement des conditions très-diverses. Sur certains points, les conditions de pente et de section peuvent encore donner à la force d'entraînement une valeur suffisante pour qu'il y ait un affouillement local, mais les matériaux en mouvement s'arrêteront bientôt. C'est là le dernier travail qui forme le lit d'étiage dont la navigation doit se servir.

Nous devons étudier en détail toutes ces actions successives.

Afin de préciser les variations du débit d'eau, nous les

définirons par les variations de hauteur dans le lit à section rectangulaire supposé inaffouillable, qui nous a servi de point de départ, et qu'il ne faut pas confondre avec le lit équivalent. Nous l'appellerons, pour abréger, lit primitif. Ce lit a une pente constante égale à la pente moyenne du lit réel. Le débit d'eau y est donc une fonction bien définie de la profondeur.

Procédons ici comme nous l'avons déjà fait, et supposons pour un instant le lit composé de deux courbes opposées, formé par le maximum de crue, inaffouillable, afin de déterminer les tendances du courant au moment où le débit est caractérisé par un abaissement h dans le lit primitif.

Le niveau, dans les deux courbes, à une distance suffisamment grande de l'inflexion, devra baisser d'une quantité plus grande que h, d'après une remarque antérieure. Mais, sur le seuil de l'inflexion, où le lit réel est plus large et moins profond que le lit primitif, le niveau tend à varier moins vite ; et il est bien facile de reconnaître que les conditions de l'écoulement exigent une augmentation de pente en ce point, pour compenser, par un excédant de vitesse, l'abaissement excessif du plan d'eau que produit la mouille d'aval. Cet excès de pente ne peut être regagné que par un gonflement du plan d'eau, en amont de l'inflexion, produisant un véritable remous.

On pourrait d'ailleurs, en faisant abstraction du débit de matières, calculer le profil en long de la surface, d'après ces données, au moyen de formules bien connues, conduisant à des résultats plus ou moins exacts et sans grand intérêt ici. Ces indications sommaires suffisent pour se rendre compte, à présent, de la variation dans la puissance d'entraînement.

D'après ce que nous venons de dire, le produit Hi, proportionnel à la force d'entraînement, doit être plus grand pour le passage du seuil de l'inflexion que pour la mouille

en amont et en aval; on sait, en effet, que ce produit varie dans le même sens que la vitesse, et la vitesse, nous l'avons dit, est plus grande sur le seuil. Et comme la largeur du lit y est également plus grande, la quantité de matières entraînable sur le seuil est bien plus considérable que dans les courbes en amont et en aval.

Si nous supposons que le débit de matières soit convenable pour maintenir le lit sans changement et en conservant la pente moyenne dans les courbes indéfinies, il y aura un peu de dépôt à l'extrémité de la mouille d'amont par l'effet du remous, approfondissement du seuil avec réduction de la pente locale tendant à diminuer le remous, et dépôt, dans la mouille d'aval, des matériaux enlevés au seuil, jusqu'à ce que l'équilibre soit rétabli.

Mais on doit remarquer que les variations de pente resteront plus fortes que pour le débit primitif; en effet, la profondeur H diminuant relativement plus sur le seuil que dans les mouilles, il faut, pour rétablir l'équilibre, que le rapport des pentes soit plus grand.

De plus, la force générale d'entraînement diminuant en même temps que le débit, il peut arriver que le lit formé par la crue maxima et tapissé par les plus gros matériaux sous son action, ne puisse plus être remanié par un courant moins puissant et qui a d'ailleurs d'autres matériaux plus petits à charrier. En sorte que l'équilibre d'entraînement ne s'établira pas absolument entre les mouilles et le haut-fond. Dans les mouilles, le courant portera tout ce qu'il peut porter; sur le haut-fond il ne pourra pas se saturer, les cailloux sous-jacents étant trop gros.

Ainsi, tandis que dans les mouilles la force d'entraînement va progressivement en diminuant, elle peut, sur le haut-fond intermédiaire, rester stationnaire; et si, à un moment donné, elle augmente au point de mettre en mouvement les gros galets qui s'y trouvent, elle arrêtera son

action dès qu'elle sera redescendue à la limite pour laquelle elle cessera de les mouvoir.

Nous arrivons donc à cette conclusion intéressante : Sur un seuil, le fond est composé des plus gros matériaux que la crue a pu y apporter. La décrue n'y laisse rien et tend plutôt à l'écrêter. En amont, au contraire, la décrue dépose des matériaux de plus en plus petits, jusqu'à ce que le débit de matières devienne nul. En même temps, la pente en amont du seuil se réduit de plus en plus, tandis qu'elle augmente sur le seuil même, pendant que le débit diminue.

Nous avons dit que la décrue *tend* à écrêter les seuils. Les écrête-t-elle réellement ? Cela dépend évidemment des conditions particulières de pente générale et de débit. Mais il est certain, pour nous, que dans la partie du Rhône que nous avons observée, cet effet se produit souvent, car on voit le chenal se modifier pendant les eaux très-basses et la profondeur y augmenter de quelques centimètres, sans que le débit augmente. Nous croyons même que, pendant les eaux les plus basses, la valeur de 1.000Hi (force d'entraînement) sur les rapides bien caractérisés n'est pas très-inférieure à la valeur moyenne de la même force dans les plus grandes crues ordinaires.

Sans que nos observations nous permettent de l'affirmer d'une manière absolue, nous sommes convaincu qu'au moins pour certains passages, la force d'entraînement diminue d'abord pendant la décrue, pour augmenter ensuite, quand les eaux deviennent très-basses.

Cette action des basses-eaux sur les seuils ne s'étend, en tout cas, jamais à toute la largeur du passage. Les eaux commencent à un moment donné à entraîner sur un point quelques pierres ; la profondeur augmentant par suite, c'est sur le même point que l'action se continuera, formant à la longue un petit rigolon. Quelquefois, au lieu d'un, il s'en formera deux ou trois moins importants.

V.

Faits confirmant la théorie.

Nous aurions voulu terminer cette note en montrant comment les faits concordent avec cette théorie; mais nous avons été arrêté par la grande difficulté qu'il y aurait à présenter, avec la précision nécessaire, les circonstances de toute nature qui devraient entrer en ligne de compte et à les discuter.

Nous pouvons cependant faire ressortir quelques conséquences qui sont bien confirmées par l'observation.

L'approfondissement du lit près des rives concaves est un fait trop connu pour qu'il soit nécessaire d'insister. Nous croyons en avoir donné une explication satisfaisante en montrant qu'il doit exister des courants latéraux allant vers la concavité à la surface et dans le sens opposé près du fond. Nous ne savons pas si l'on a constaté l'existence du courant de fond, mais le courant de surface est bien facile à observer.

Tout le monde sait également que l'on rencontre généralement des hauts-fonds près des inflexions. Nous en avons expliqué la formation, et nous avons dit qu'ils devaient toujours se trouver en aval des inflexions géométriques de l'axe du lit, en raison de l'influence propre des endiguements, à laquelle peut s'ajouter l'action des courants de crue quand les berges sont submersibles. Ce résultat est complétement d'accord avec les observations si précises de M. Fargues sur la Garonne (*).

En même temps que l'*écart du maigre*, M. Fargues avait reconnu l'*écart de la mouille*. Nous avons été également

---

(*) Voir *Annales des ponts et chaussées*, 1868, 1er semestre.

conduit à admettre que, dans le cas d'une courbe à courbure variable, la profondeur maxima doit être en aval du sommet de la courbe.

Nous sommes arrivé encore à cette conclusion que les seuils ou hauts-fonds sont formés de plus gros matériaux que le reste du lit. Nous ne pensons pas que l'on puisse contredire ce résultat qui est bien conforme à toutes nos observations. D'ailleurs, s'il ne nous a pas été possible de suivre l'action des crues sur les hauts-fonds, nous avons souvent constaté par des sondages que le relief en est plus considérable par des eaux moyennes après les crues que par des eaux tout à fait basses.

Enfin nous avons dit qu'un lit régulier, de profondeur constante, n'est pas stable. Il ne doit donc pas se produire naturellement. Et en effet, le lit du Rhône, comme nous l'avons dit, est constitué par une succession bien régulière de mouilles et de rapides. Et cette disposition se retrouve, croyons-nous, dans les autres rivières à fond mobile.

En résumé, nous sommes convaincu qu'en examinant attentivement tous les faits, on en trouvera toujours une explication rationnelle dans la théorie que nous avons développée.

Valence, août 1878.

N° 50

NOTE
SUR
LE CHEMIN DE FER A VOIE ÉTROITE
D'OCHOLT A WESTERSTEDE, EN ALLEMAGNE.

Par M. BAUM, ingénieur des ponts et chaussées.

§ 1er. — Exposé.

La petite ligne d'Ocholt à Westerstede, longue de 7 kilomètres, traverse, dans les plaines basses de l'Allemagne du Nord, un pays sans industrie, habité par une population agricole assez clair-semée. La seule localité de quelque importance, desservie par le chemin de fer, est la petite ville de Westerstede, ayant 1.700 habitants, et environnée de petits hameaux. Le chiffre de la population de Westerstede, en tenant compte tant des habitants agglomérés que de ceux disséminés dans les hameaux voisins, s'élève à 2.000 âmes.

On avait admis, lors de la construction de ce chemin de fer à voie étroite, que le trafic probable entre Westerstede, qui est la station terminus de la ligne, et Ocholt, qui est la gare de la grande ligne de Leer à Oldenbourg, du chemin de fer d'État d'Oldenbourg, gare dans laquelle débouche la petite ligne, serait en moyenne de 20 à 25 voyageurs par jour, dans chaque sens, et de 10 à 15 tonnes. Ces prévisions du mouvement des voyageurs et des marchandises étaient, comme on le voit, fort modestes. Aussi la construction et l'exploitation du chemin de fer d'Ocholt à Westerstede constituent-elles le premier essai fait en Allemagne pour doter d'une voie ferrée une région exclusivement agricole et relativement pauvre.

Les résultats amenés par cet essai ont un intérêt tout particulier pour nous; car le réseau des chemins de fer d'intérêt local qu'il reste à créer en France sera appelé, en général, à desservir des pays sans industrie et adonnés à l'agriculture. Le trafic qui se développera sur ce réseau n'aura pas une très-grande importance, et la principale préoccupation de ceux qui construiront ce réseau devra être de proportionner l'outil qu'ils créent, et par conséquent les dépenses de construction, au travail utile à produire. Le développement et le succès des chemins de fer d'intérêt local n'est possible qu'à cette condition.

La ligne d'Ocholt à Westerstede offre l'exemple le plus frappant que nous connaissions de cette harmonie, de ce rapport rationnel qui doit exister, sur des chemins de fer à si faible trafic, entre les dépenses de construction et les recettes et dépenses de l'exploitation. Pour ce motif, il a paru utile de donner un court résumé du système de construction et des résultats de l'exploitation de ce chemin.

§ 2. — Description du chemin de fer d'Ocholt à Westerstede. Voie. — Matériel roulant.

Longueur et largeur de la voie. — La longueur du chemin entre les deux gares extrêmes est de $7^{km},115$.

La largeur de la voie est de $0^{m},75$.

Sur une longueur de 2.700 mètres, la voie est posée sur l'accotement d'une route. Le reste de la ligne est situé, partie sur des terres sablonneuses et des prairies tourbeuses, partie dans des bois.

La largeur de la plate-forme est de $1^{m},50$; les talus ont une inclinaison de $^2/_3$.

Rampes et courbes. — Les rampes ou pentes sont peu élevées : la plus forte déclivité atteint $0^{m},005$ sur un faible parcours.

Le rayon minimum des courbes de la voie courante ne

descend pas au-dessous de 250 mètres. Il y a une courbe de 82 mètres de rayon dans la gare d'Ocholt.

Ouvrages d'art. — L'ouvrage d'art le plus important est un pont de $4^m,25$ d'ouverture sur une petite rivière. Outre ce pont, il existe encore le long du chemin quelques aqueducs et caniveaux.

Rails et traverses. — Les rails employés sont en acier Bessemer et à simple champignon (rail Vignole). Le poids du mètre courant atteint $12^k,6$. La longueur d'un rail est de $7^m,5$; sa hauteur de $0^m,070$. Les rails sont éclissés et reposent sur des plaques en fer dans les courbes.

Les traverses ont les dimensions suivantes :

	mètres.
Largeur	0,20
Hauteur	0,10
Longueur	1,33

L'intervalle qui existe entre deux traverses consécutives mesure $0^m,67$.

Stations et haltes. — Entre les deux stations extrêmes de Weterstede et d'Ocholt, et à peu près au milieu de la ligne, il y a une halte auprès d'une maison forestière appelée Sudholz. Les trains s'arrêtent à cet endroit afin de desservir une ferme située à proximité.

La gare d'Ocholt, qui appartient au chemin de fer de l'État d'Oldenbourg, est la gare commune à la grande et à la petite ligne. La compagnie du chemin de fer à voie étroite ne possède, dans la gare d'Ocholt, qu'un dépôt abritant une machine et une voiture, et une installation très-simple pour le service d'alimentation de l'eau.

Le chemin de fer de l'État d'Oldenbourg ne fait payer aucune redevance à la petite compagnie locale pour le loyer et l'usage de la gare commune. Le service de la gare commune est entre les mains des agents du chemin de fer de l'État. Le transbordement des expéditions partielles est fait gratuitement par eux; celui des wagons complets est

effectué par eux contre remboursement de la dépense effective de main-d'œuvre.

La gare de Westerstede comprend un dépôt de machines, un hangar pour les voitures et wagons, une maison d'habitation pour deux agents. La voie d'accès à la gare est assise sur la rue principale de la localité, sur un parcours d'environ 200 mètres. Les locaux nécessaires au service de l'exploitation, tels que : salle d'attente, bureau d'expédition et halle à marchandises, se trouvent dans une auberge, et sont mis gratuitement à la disposition de la compagnie locale par le propriétaire de l'immeuble.

Locomotives. — Le service des trains est fait par deux ocomotives-tenders, stationnées à Westerstede. Elles ont leux essieux couplés.

Leurs principales dimensions sont :

Écartement des essieux	$1^{m},50$
Diamètre des essieux	$0\ ,75$
Diamètre des cylindres	$0\ ,165$
Course du piston	$0\ ,305$
Surface de chauffe	$15^{m^2},9$
Surface de grille	$0^{m^2},27$
Poids de la machine vide	$5^{t},450$
Poids moyen de la machine en charge	$6\ ,800$

Le chauffage des machines a lieu avec de la tourbe. Chaque machine peut porter un approvisionnement de 500 kilog. de tourbe et $0^{m^3},7$ d'eau.

Voitures. — Le nombre des voitures de la compagnie du chemin d'Ocholt à Westerstede est de trois ; elles ont quatre essieux chacune ; la caisse de la voiture repose sur deux chariots à deux essieux. L'entrée des voitures est située sur les côtés perpendiculaires à la voie. Chaque voiture est munie de deux plates-formes, une à chaque extrémité, donnant accès aux portes. Les bancs sont disposés parallèlement à la voie, et, le long des parois intérieures des voi-

tures, entre les deux bancs qui se trouvent dans chaque voiture, il existe un couloir.

Les principales dimensions d'une voiture sont :

Largeur de la voiture.	1m,8
Longueur de la caisse.	9 ,0
Longueur y compris les deux plates-formes.	10 ,5
Diamètre des roues.	0 ,75
Hauteur du plancher au-dessus du rail.	0 ,64
Poids d'une voiture.	4t,950
Poids des essieux et des roues.	1 ,600
Diamètre des portées de calage.	0m,090
Diamètre des fusées.	0 ,055

Les roues pénètrent dans le plancher des voitures.

Deux voitures sont mixtes et renferment des places de 2e et de 3e classes, à savoir :

2e classe.	6 places.
3e classe.	22 places.

Ces deux voitures ont également un espace affecté aux bagages.

La troisième voiture contient 36 places de 3e classe.

Les essieux sont en acier fondu. Les roues sont en fer forgé, et pleines; les bandages en acier fondu. Les freins sont manœuvrés de la plate-forme des voitures.

Wagons. — Le parc de wagons se compose de deux wagons couverts et de quatre wagons plates-formes. Leurs principales dimensions sont :

Largeur de la caisse.	1m,65
Longueur de la caisse.	5 ,0
Puissance de chargement.	5 tonnes.
Poids d'un wagon couvert.	2t,45
Poids d'un wagon-tombereau.	2 ,4
Poids des essieux et des roues d'un wagon.	0 ,800

Prix du matériel roulant. — Une locomotive-tender a coûté 12.125 francs. Le prix d'nne voiture mixte, 2e et

3e classes, s'élève à 5.800 francs; celui d'une voiture de 3e classe atteint 5.087 francs.

Le prix d'acquisition d'un wagon couvert est de 1.925 fr.; un wagon-tombereau coûte 1,320 francs.

Les appareils de traction et de choc de matériel roulant sont placés dans l'axe de ce matériel.

§ 3. — Capital social. — Dépense de premier établissement.

Capital social. — La compagnie du chemin de fer d'Ocholt à Westerstede a construit cette ligne, en partie avec ses propres moyens, en partie à l'aide de subventions locales, et de garantie partielle du capital donné par l'État d'Oldenbourg.

Lorsque les travaux de construction de la ligne furent commencés, la compagnie locale avait à sa disposition un capital de 280.000 francs, en chiffres ronds. Ce capital était créé de la manière suivante :

	francs.
1°) 150 actions de priorité	56.250
2°) 196 actions de fondation.	73.500
3°) Subvention donnée par la ville de Westerstede.	37.500
4°) Capital d'obligations garanties par l'État.	112.500
Total.	279.750

Chaque action de priorité était de 375 francs. Elle devait recevoir un intérêt annuel au taux de 5 p. 100, pris sur le produit net disponible, après qu'on avait défalqué des recettes de l'exploitation :

1°) Les dépenses de l'exploitation;
2°) Les versements faits au fonds de réserve.

Les actions de fondation, au nombre de 196, ont chacune une valeur de 375 francs. Les porteurs de ces actions ne reçoivent un intérêt de leur argent que dans le cas où il

reste un produit net disponible, après qu'il a été attribué aux actions de priorité, un intérêt de 5 p. 100, et aux porteurs des obligations garanties par l'État, un intérêt de 4 1/2 p. 100.

L'État d'Oldenbourg a donné une garantie de 4 1/2 p. 100 au capital des obligations. La compagnie locale a pris envers l'État d'Oldenbourg l'engagement suivant : si dans l'avenir, pour un exercice déterminé, une fraction du produit net restait disponible après qu'un intérêt de 5 p. 100 aurait été distribué aux actions de priorité, et un intérêt de 4 1/2 p. 100 aux actions de fondation, cette fraction disponible du produit net serait employée à rembourser à l'État les sommes avancées en vertu de la garantie d'intérêt.

Dépenses de premier établissement. — Au moment de la mise en exploitation de la ligne d'Ocholt à Westerstede, la dépense totale du premier établissement s'élevait à (1er septembre 1876) 227.000 francs, se décomposant comme il suit :

	francs.
Acquisition de terrains.	25.000
Terrassements	28.700
Ouvrages d'art.	3.800
Superstructure.	96.300
Bâtiments.	7.500
Clôtures.	1.900
Matériel roulant	55.000
Frais généraux.	8.800
Total.	227.000

Si l'on cherche le prix de revient du kilomètre de la ligne, on arrive aux chiffres suivants :

	francs.
Acquisition de terrains.	3.521
Terrassements	4.057
Ouvrages d'art.	535
Superstructure.	13.564
Bâtiments.	1.057
A reporter.	22.734

	francs.
Report.	22.734
Clôtures.	268
Matériel roulant.	7.747
Frais généraux.	1.240
Total.	31.989

soit en chiffre rond 32.000 francs par kilomètre.

Par suite de travaux de parachèvement exécutés dans le courant des années 1877 et 1878, les dépenses de premier établissement atteignaient :

	francs.
A la fin de 1877.	240.200
— 1878.	243.800

ce qui donnait une dépense kilométrique, pour la construction du chemin :

	francs.
A la fin de 1877.	33.800
— 1878.	34.300

On a vu plus haut que le capital de la petite compagnie locale s'élevait, en chiffres ronds, à 279.800 francs. Sur cette somme, il n'avait été dépensé, à la fin de 1878, que 243.800 francs; il restait par suite, dans les caisses de la compagnie, une somme en réserve de 36.000 francs, destinée aux travaux de parachèvement, de renouvellements.

Le fonds de réserve créé par les statuts de la compagnie, pour faire face aux dépenses de réfection et de renouvellement, devait être alimenté par un versement annuel de 750 francs prélevé sur le produit net. La valeur totale du fonds de réserve ne devait pas dépasser la somme de 18.750 francs.

§ 4. — Exploitation de la ligne. — Trains. — Tarifs. — Service de la poste. — Personnel.

Service des trains. — Le nombre des trains mis en circulation sur la ligne, le 1er septembre 1876, lors de l'ouverture de l'exploitation, était de trois par jour, et dans chaque

sens. Le 26 novembre 1876, le nombre des trains fut porté à quatre par jour, et dans chaque sens.

En 1878, on revint de nouveau au chiffre primitif de trois trains par jour, et dans chaque sens. Ces trains avaient, à Ocholt, la correspondance des trains de la grande ligne.

Les trains parcourent la ligne dans un laps de temps de vingt minutes, soit avec une vitesse de 21 kilomètres à l'heure.

Le personnel de chaque train se compose d'un mécanicien et d'un conducteur. Le conducteur du train délivre les billets aux voyageurs qui montent dans le train à la halte de la maison forestière de Sudholz.

Tarifs. — Les tarifs des voyageurs et des marchandises sont construits sur des bases très-simples.

Pour les voyageurs, le transport entre Ocholt et Westerstede coûte :

	francs.
2e classe.	0,625
3e classe.	0,375

Le trajet Sudholz-Westerstede ou Sudholz-Ocholt se paye :

	francs.
2e classe.	0,375
3e classe.	0,25

Le prix de transport des bagages est de 0f,0375 par fraction indivisible de 10 kilog., quel que soit le parcours.

Le tarif des marchandises ne contient pas de classification. Il y a trois catégories de taxes de marchandises :

1° Les marchandises de toutes sortes, en poids inférieur à 2.000 kilog., sont tarifées à 25 centimes les 100 kilog.

2° Les produits de toutes espèces, en poids d'au moins 2.000 kilog., ou taxées au moins pour ce poids, sont tarifées à 0f,1875 les 100 kilog.

Néanmoins, lorsque des articles sont désignés comme

marchandises volumineuses et encombrantes dans les tarifs généraux du chemin de fer de l'État d'Oldenbourg, la taxe à percevoir est d'une fois et demie la taxe ordinaire.

3° La taxe à appliquer aux marchandises en chargement complet de wagons, c'est-à-dire de 5.000 kilog., est :

	francs.
Pour les wagons couverts.	6,25
Pour les wagons plats.	5,00

La manutention des marchandises et l'expédition des voyageurs et des trains est faite à Ocholt par les soins du chemin de fer de l'État d'Oldenbourg.

Nature du trafic. — Le trafic le plus important prévu sur la ligne à voie étroite était celui des voyageurs. Le pays est couvert en grande partie de bois. Il n'y a pas d'industrie; les habitants s'occupent d'agriculture et de l'élevage des bestiaux.

Le principal courant du trafic s'est établi vers Oldenbourg.

Service de la poste. — L'administration de la poste fait transporter par les trains du chemin de fer d'Ocholt à Westerstede tous ses envois de paquets, d'argent ou de lettres. Deux trains dans chaque sens emportent tous les jours les paquets, les envois d'argent et la correspondance de l'administration des postes. Le troisième train ne transporte que des lettres.

La compagnie du chemin de fer à voie étroite reçoit une indemnité annuelle de 1.200 francs de l'administration des postes, en échange du service qu'elle rend en transportant les envois de la poste. Le montant de cette indemnité est dû à la compagnie en vertu d'un traité que la direction supérieure de la poste a conclu avec le chemin de fer, avec l'autorisation du chancelier de l'Empire. Avant l'ouverture à l'exploitation de la ligne à voie étroite, le service de la poste était fait par l'omnibus qui desservait Westerstede, et se rendait à Zwischenahn, station de la ligne de

Leer à Oldenbourg, du chemin de l'État d'Oldenbourg. Le propriétaire de l'omnibus recevait de la poste une subvention annuelle de 1.200 francs. Aujourd'hui cette subvention est versée entre les mains de la compagnie du chemin de fer à voie étroite. Le service d'omnibus cessa du jour de la mise en exploitation de la ligne d'Ocholt à Westerstede.

Personnel. — Le personnel de la compagnie locale se compose du chef de station de Westerstede et des agents des trains et des machines.

Il y a deux mécaniciens et un conducteur chef de train. Tous les trois habitent à Westerstede.

Le contrôle et la surveillance du service de l'exploitation et de l'entretien de la voie sont entre les mains des agents du chemin de fer de l'État d'Oldenbourg.

Le chef de gare de Westerstede n'est autre chose que le propriétaire de l'auberge dont une partie des locaux est affectée au service du chemin de fer. Cet agent, mis au courant préalablement de ce qu'il lui était indispensable de savoir pour l'expédition des voyageurs, des marchandises et des trains, et pour la gestion de la caisse, remplit gratuitement ses fonctions, fort peu compliquées du reste.

Il n'y a point jusqu'à présent de ligne de télégraphe le long du chemin de fer à voie étroite.

Il n'y a pas de gardes aux passages à niveau. Le mécanicien sonne une cloche à l'approche de ces passages. Les communes traversées par le chemin ont fait placer à leurs frais, aux abords des passages à niveau les plus fréquentés, des poteaux indicateurs, invitant les passants à faire attention aux trains annoncés par les sons de cloche.

§ 5. — Recettes et dépenses de l'exploitation. — Produit net.

Recettes. — Le chemin de fer à voie étroite d'Ocholt à Westerstede fut ouvert à l'exploitation le 1er septembre 1876.

Les recettes de l'exploitation se sont élevées sur toute la ligne :

	francs.
En 1877, à.	18.583
En 1878, à.	17.910

On peut décomposer, comme il suit, les recettes de l'année 1878 :

	francs.
Voyageurs et bagages.	12.778,75
Marchandises	3.807,50
Poste.	1.200,00
Divers	123,75
Total.	17.910,00

Le parcours des trains ayant été en 1878, de 15.330 kilomètres, à raison de trois trains par jour et dans chaque sens, la recette par kilomètre de train a atteint :

	francs.
En 1878.	1,1625
Elle avait été, en 1877, de.	1,125

La recette par kilomètre de la ligne exploitée s'est élevée (*) :

	francs.
En 1877, à.	2.612,50
En 1878, à.	2.558,75

(*) Nous avons indiqué dans les *Annales* du mois de novembre 1878, une méthode approximative d'évaluation des recettes kilométriques probables d'un chemin de fer agricole; nous étions arrivé à la conséquence (p. 542) que lorsqu'un chemin agricole débouche, sur la grande ligne, dans une petite ville dont la population ne dépasse pas 3.000 ou 4.000 habitants, la recette moyenne annuelle par habitant est d'environ 10 francs dans les premières années de l'exploitation. Si l'on applique cette règle au chemin à voie étroite d'Ocholt à Westerstede, qui dessert une population de 2.000 habitants, on trouve que la densité moyenne de la population est de 281 habitants par kilomètre, et que la recette kilométrique annuelle doit s'élever à 2.810 francs. La recette kilotrique effective a été, comme on l'a vu :

	francs.
En 1877 de.	2.612.50
En 1878.	2.558,75

Dépenses de l'exploitation. — Les dépenses de l'exploitation du chemin de fer d'Ocholt à Westerstede ont atteint les chiffres suivants :

	francs.
En 1877	12.083,75
En 1878	10.720,00

Les divers éléments qui entrent dans la composition des chiffres de la dépense totale de l'exploitation en 1878, sont les suivants :

	francs.
Frais généraux	460,00
Surveillance et service des trains. .	4.813,75
Salaire des ouvriers des stations. . .	815,00
Entretien de la voie, éclairage et chauffage des stations	2.332,50
Entretien du matériel roulant.	763,75
Combustible, graisse, huile, etc. . .	1.535,00
Total.	10.720,00

Il résulte des chiffres de la dépense totale d'exploitation, que la dépense par kilomètre de train a été :

	francs.
En 1877, de.	0,725
En 1878, de	0,700

Quant aux dépenses d'exploitation rapportées au kilomètre de ligne, elles s'élèvent :

	francs.
En 1877, à.	1.798,75
En 1878, à.	1.522,25

Les chiffres de dépenses que nous venons d'indiquer sont très-faibles, et il n'existe pas, que nous sachions, un chemin de fer à traction de locomotives sur lequel les dépenses par kilomètre de train et par kilomètre de ligne soient inférieures à celles du chemin à voie étroite d'Ocholt à Westerstede. Il y a même, croyons-nous, peu de tramways à vapeur qui soient en état d'accuser des dépenses kilométriques plus faibles que celles que nous venons d'indiquer

plus haut pour les trains de la ligne d'Ocholt à Westerstede.

Produit net. — Le produit net de l'exploitation de la ligne à voie étroite d'Ocholt à Westersdete a atteint :

	francs.
En 1877	6.601,25
En 1878	7.190,00

Ce produit net correspond à un taux de l'intérêt du capital de construction dépensé, égal à :

	p. 100.
En 1877	2,78
En 1878	3,00

Voici comment, en particulier, a été employé le produit net de 1878 :

	francs.
Intérêt à 4 1/2 p. 100 du capital des obligations émises	3.349,75
Intérêt à 5 p. 100 du capital des actions de priorité	2.812,50
Dotation du fonds de réserve pour réfections et renouvellements	750,00
Intérêt à 0,37 p. 100 du capital des actions de fondation	269,50
Imputation à l'exercice suivant	8,25
Total	7.190,00

§ 6. — Conclusions.

Nous venons d'indiquer rapidement les conditions de la construction et de l'exploitation d'un chemin de fer à voie étroite, et de montrer que sur une petite ligne d'intérêt local, longue de 7 kilomètres, avec une recette annuelle de 2.600 francs par kilomètre, il avait été possible d'obtenir, dès la première année de l'exploitation, une rémunération d'environ 3 p. 100 du capital de construction dépensé. La dépense de construction par kilomètre, y compris le matériel roulant, est de 34.000 francs; la dépense d'exploitation annuelle par kilomètre de ligne n'atteint pas

1.600 francs, en 1878. Le chemin de fer à voie étroite d'Ocholt à Westerstede peut donc, sans aucun doute, servir d'exemple comme chemin construit et exploité économiquement.

Lorsqu'il s'agira en France de construire le réseau du chemin de fer d'intérêt local, le petit chemin d'Ocholt à Westerstede pourra être étudié avec fruit par tous ceux qui veulent le développement et le succès de notre réseau d'intérêt local. Non pas que la situation soit identique en France et dans le grand duché d'Oldenbourg; car, dans chaque cas particulier, il convient de tenir compte des conditions locales de la région que devra traverser le chemin de fer. Mais, ce qu'il est intéressant et utile même de connaître, ce sont les causes qui ont amené le plein succès de l'établissement d'un chemin à voie étroite dans un pays agricole et peu riche.

Avant tout, nous observerons une grande simplification de la réglementation : ce qui n'est pas indispensable est laissé de côté; la largeur de la plate-forme est réduite au strict minimum; point de ligne télégraphique, point de barrières.

Une grande bienveillance préside aux relations qui existent entre l'administration de la grande ligne de Leer à Oldenbourg, qui appartient à l'État d'Oldenbourg, et la compagnie du chemin à voie étroite affluent de cette grande ligne. Le chemin de fer de l'État d'Oldenbourg ne fait payer à la compagnie locale aucun loyer pour la gare commune. Il fait effectuer, gratuitement par ses agents, le service de la gare commune d'Ocholt. Il n'exige que le remboursement des frais occasionnés par les transbordements des wagons en charge complète. Les frais généraux de l'exploitation n'ont atteint, en 1878, que 460 francs. Les premières années de l'exploitation d'une petite ligne locale, comme celle d'Ocholt à Westerstede, sont toujours les plus difficiles à traverser. Les rela-

tions bienveillantes de la grande ligne avec l'affluent, l'attitude presque paternelle prise par le grand chemin vis-à-vis du petit, ont aplani bien des difficultés au milieu desquelles le chemin à voie étroite aurait pu sombrer.

C'est grâce à cette situation excellente de la ligne d'Ocholt à Westerstede que la compagnie locale a pu, avec une recette par kilomètre atteignant à peine 2.600 francs par an, payer intégralement l'intérêt de ses obligations et n'a pas été obligée de faire appel à la garantie que l'État d'Oldenbourg lui avait donnée pour une fraction de son capital.

La ligne d'Ocholt à Westerstede a été construite dans des conditions très-favorables : le tracé est facile, les pentes sont faibles ; de plus, sur une partie de son parcours, elle a pu emprunter les accotements de la route, assez large pour permettre encore la facile circulation des voitures. La main-d'œuvre n'est pas chère dans cette partie de l'Allemagne, et le combustible qu'on trouvait sur place, puisque le chemin traversait des tourbières, ne revenait qu'à 12 fr. la tonne.

Il est clair que dans la majeure partie des cas, le réseau d'intérêt local, en France, sera construit dans des conditions moins favorables que la ligne que nous venons d'étudier : les rampes seront beaucoup plus fortes, les courbes plus raides, la main-d'œuvre et le combustible plus chers. Les dépenses de construction des chemins d'intérêt local et celles de l'exploitation de ces chemins atteindront, en général, un chiffre plus élevé en France.

La ville de Westerstede et l'État d'Oldenbourg ont contribué dans une large mesure à la création de la petite ligne : la commune de Westerstede a alloué une subvention de 37.500 francs, soit environ 5.000 francs par kilomètre. L'État d'Oldenbourg a donné une garantie de 4 1/2 p. 100 au capital des obligations s'élevant à 112.500 francs, soit un capital garanti d'environ 15.000 francs par kilomètre.

Ces deux principaux intéressés à la construction de la ligne ont donc puissamment aidé de leur argent et de leur crédit la petite compagnie locale.

De cette étude il convient surtout de retenir que le réseau d'intérêt local français, pour devenir prospère, devra être établi dans des conditions analogues à celles de la ligne d'Ocholt à Westerstede. En présence du peu d'importance du trafic de ce réseau, trafic qui sera surtout de nature agricole, il est essentiel que la dépense de construction soit réduite au strict minimum, que l'instrument qu'on veut créer soit en rapport avec le travail à effectuer, il est indispensable d'adopter la voie étroite ; il est nécessaire d'autoriser, dans la construction et l'exploitation de ce réseau, toutes les simplifications compatibles avec le faible trafic et la faible vitesse des trains. Il importe aussi que tous les intéressés viennent concourir à l'établissement de ce réseau, et que les grandes lignes de chemins de fer tendent une main secourable à ces petits affluents qui déversent sur elles les produits des régions agricoles qu'ils traversent.

Paris, en mai 1879.

N° 51

BIBLIOGRAPHIE.

SUR LA FONDATION DE L'ANCIEN PORT DE CHERBOURG 1686, — 1739 à 1743, — 1758

NOTES ET PLANS

Publiés par M. le marquis A. DE CALIGNY, correspondant de l'Institut, et M. L. E. BERTIN, ingénieur de la marine.

Le mémoire dont nous reproduisons le titre résume l'histoire du port de Cherbourg antérieurement à l'exécution de la digue, et comprend, à titre de pièces justificatives :

1° Un exposé détaillé des vues de Vauban sur l'avenir et les améliorations possibles du port ;

2° Une correspondance échangée notamment entre le maréchal d'Asfeld et l'ingénieur Louis-Roland de Caligny, qui nous retrace toutes les phases du travail.

Le nom de Vauban semble inséparable de l'histoire des grandes entreprises du XVIIe siècle. Vauban avait esquissé, dès 1686, l'ensemble d'un projet tendant à créer un port à l'embouchure de la Divette, et, huit ans après, il avait même émis l'idée de fermer la rade par une digue. Son projet comprenait un avant-port, ou mieux un chenal d'accès limité par deux jetées latérales, un bassin à flot avec écluses, et un système de chasse.

Le mémoire de MM. de Caligny et Bertin met en évidence les changements successifs qui furent apportés, soit à la conception d'ensemble de Vauban, soit aux procédés

pratiques qu'il proposait, et nous fait pour ainsi dire assister aux progrès que l'art de l'ingénieur accomplit durant le cours du dernier siècle.

Les dispositions du projet de 1686 accusent, soit dans le tracé des jetées, soit dans les détails d'exécution, une influence hollandaise qui apparaît surtout dans l'emploi des jetées en charpente et des fascinages. Vauban eût même admis pour l'écluse un radier en bois. Toutes ces dispositions d'origine hollandaise se modifient en cours d'exécution, grâce surtout à l'influence de l'ingénieur Caligny. Un radier entièrement maçonné remplace le plancher d'écluse qu'avait indiqué Vauban; un large avant-port entouré de quais est projeté en avant de l'écluse, tandis que Vauban se contentait du chenal d'accès pour faire stationner les navires au besoin; enfin des jetées en maçonnerie remplacent les jetées de charpente du projet de Vauban.

Une lettre de l'ingénieur de Caux relate une série d'essais tentés dès 1782 pour exécuter les fondations de la digue par enrochement : nous trouvons là le point de départ du procédé qui fut définitivement suivi : le seul résultat qu'une longue et coûteuse expérience ait ajouté à ces premières tentatives, fut la connaissance précise du niveau où le système des enrochements devait s'arrêter. Ce ne fut qu'en 1832 qu'on put assigner à leur emploi une limite qui répond à la cote des basses mers de vive eau.

Tels sont les principaux faits qui ressortent du mémoire de MM. Caligny et Bertin, tel est l'intérêt qui s'y rattache. Ce travail est, de la part d'un de ses auteurs, un hommage à l'ingénieur éminent dont il porte le nom; mais c'est avant tout une de ces monographies utiles, appelées à éclairer les origines et la formation des méthodes qui constituent de nos jours l'art de l'ingénieur.

N° 52

L'EXPOSITION DU MINISTÈRE FRANÇAIS DES TRAVAUX PUBLICS EN 1878

MÉMOIRE

Par M. Fr. BÖMCHES, inspecteur de la compagnie des chemins de fer du Sud de l'Autriche (*).

Ce mémoire est une revue méthodique et raisonnée de notre exposition des travaux publics; tous les faits essentiels, tous les détails qui marquent, dans une direction quelconque, un progrès accompli, y sont soigneusement notés, et appréciés avec une sûreté de vues que n'altère jamais l'impartiale bienveillance de l'auteur. L'étendue même des développements témoigne de l'intérêt qui s'attache, à l'étranger, à nos Expositions, et justifie bien les sacrifices que l'administration française s'impose pour les rendre vraiment dignes d'une attention aussi honorable. Nous ne pouvons que renvoyer les lecteurs des *Annales* à cet excellent tableau de nos propres travaux; mais nous croyons utile de montrer comment sont appréciés au dehors nos progrès récents ou nos tendances actuelles, en traduisant l'un des passages où l'auteur rapproche notre

(*) *Die Ausstellung des französischen Bauministeriums im Jahre* 1878. *Kurtzgefasster Bericht über die vorhandenen Objecte und Materien mit besonderer Rücksichtnahme auf die Wirksamkeit der technischen Sectionen des Ministeriums*, von Friedrich Bömches, Inspector der R. K. priv. Südbahn-Geselleschaft, Diplom. Ingenieur der « École des ponts et chaussées ».

Exposition de 1878 de celle qui l'a précédée. Voici en quels termes M. Bömches établit ce parallèle :

« Si nous comparons la dernière exposition du ministère avec les expositions antérieures, nous lui trouvons comme caractère essentiel de marquer une évidente tendance vers la création de travaux d'une nature de plus en plus productive. Ce caractère dominant se manifeste dans le soin particulier qui est donné à la technique de l'agriculture, c'est-à-dire aux travaux hydrauliques ayant pour résultat l'amélioration du sol et l'utilisation industrielle des eaux. A côté des intéressants ouvrages hydrauliques, se place toute la série des travaux qui mettent en lumière, dans toutes les branches de la science de l'ingénieur, les résultats produits par l'active direction que le ministère leur imprime, et montrent ce qui a été fait jusqu'à ce jour pour le développement des voies de communication, soit par eau, soit par terre... »

Comme résumé de son travail, M. Bömches insiste sur l'influence de l'organisation des corps des ponts et chaussées et des mines qui recueillent, coordonnent et dirigent dans leur mise en œuvre les forces productives du pays ; et sa conclusion est de souhaiter à sa propre nation d'imiter cette organisation féconde.

Enregistrons enfin les appréciations qui reviennent, en plusieurs points du mémoire, sur l'enseignement de l'art de l'ingénieur en France, « cet enseignement où la pratique et la théorie s'associent si heureusement l'une à l'autre ». M. Bömches appartient à titre d'élève externe à notre École des ponts et chaussées : nous aimons à recueillir, de la part des ingénieurs formés parmi nous, ces marques de souvenir et d'attachement ; elles montrent une fois de plus toute la portée de cette précieuse institution de l'externat, qui rapproche par la communauté des traditions les ingénieurs des nationalités les plus diverses, et ménage aux membres du corps des ponts et chaussées, dans leurs mis-

sions les plus lointaines, un accueil de confraternité toujours si obligeant et si cordial. Souhaitons de voir de plus en plus s'élargir une institution qui nous assure au dehors de telles sympathies, et répand, aussi loin que rayonne l'enseignement de notre École, l'esprit même qui anime le corps des ingénieurs français.

OB	ES ent mb.	Rece
npagnies es de con exploitati luire des re	2.266	(a)
onnes 3 lonnes es fond	2.651	11
s départ		2
rvation its pen	78.080	
nt don	27.530	
rtés da	05.722	
hiet à exploi	»	
ar la	»	
la mi	00.000	
peut	38.175	
nbr		
peut	»	
pul		
riel	2.409.289	1
à F		
e	12.904.656	7
ir	8.901.645	6
)	10.251.221	84
se		
m	686.219	52
1	6.407.600	58
1		
		43
		91
		1.0
		1
		1
		67
		23
		20

N° 53

DIRECTION GÉNÉRALE [illegible] CHEMINS DE FER. — DIRECTION DE LA CONSTRUCTION. — DIVISION DU CONTRÔLE ET DE LA STATISTIQUE

RÉSULTATS COMPARATIFS DE L'EXPLOITATION DES CHEMINS DE FER D'INTÉRÊT LOCAL (Années 1878 et 1877)

COMPAGNIES ET DÉPARTEMENTS.	1878 — LONGUEUR exploitée au 31 décemb.	1878 — LONGUEUR moyenne exploitée pendant l'année.	1878 — DÉPENSES d'établissement au 31 décemb.	1878 — [illegible]LTATS DE L'EXPLOITATION DU 1er JANVIER AU 31 DÉCEMBRE — TOTAUX — Rec[illegible]tes.	1878 — TOTAUX — Dépenses.	1878 — TOTAUX — Produit net.	1878 — PAR KILOMÈTRE — Recettes.	1878 — PAR KILOMÈTRE — Dépenses.	1878 — PAR KILOMÈTRE — Produit net.	1877 — LONGUEUR exploitée au 31 décemb.	1877 — LONGUEUR moyenne exploitée pendant l'année.	1877 — DÉPENSES d'établissement au 31 décemb.	1877 — RÉSULTATS DE L'EXPLOITATION DU 1er JANVIER AU 31 DÉCEMBRE — TOTAUX — Recettes.	1877 — TOTAUX — Dépenses.	1877 — TOTAUX — Produit net.	1877 — PAR KILOMÈTRE — Recettes.	1877 — PAR KILOMÈTRE — Dépenses.	1877 — PAR KILOMÈTRE — Produit net.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	kilom.	kilom.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	kilom.	kilom.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.	fr.
Achiet à Bapaume et à Marcoing (*). — *Nord et Pas-de-Calais* (*)	31	(a) 7	(a) 692.266	(a) [illegible]	(a) 52.532	(a) 42.620	(a) 13.593	(a) 7.505	(a) 6.088	24	7	692.266	97.854	53.175	14.679	13.979	7.596	6.383
Ardennes (chemins des) : Carignan à Messempré — Monthermé (station) à Monthermé (ville). — Vrigne-Meuse à Vrigne-aux-Bois. — *Ardennes*	(b) 15	16	972.651	[illegible]	115.672	— 2.153	7.095	7.229	— 131	15	16	972.651	122.026	113.052	8.974	7.627	7.066	561
Argonne (chemin de l') : Amagne à Apremont. — *Ardennes*	(b) 65	31	»	[illegible]	167 176	67 664	7.575	5.393	2.182	27	27	»	239.276	167.351	71.925	8.862	6.198	2.664
Avricourt à Blamont et Cirey. — *Meurthe-et-Moselle*	(b) 18	18	1.578.080	[illegible]	69.384	51.169	6.697	3.855	2.812	18	18	1.578.428	125.992	73.662	52.330	7.000	4.092	2.908
Barbezieux à Châteauneuf. — *Charente*	18	19	»	[illegible]	»	»	5.143	»	»	18	19	»	91.392	»	»	1 968	»	»
Bayonne à Biarritz (c) — *Basses-Pyrénées*	8	8	1.727.530	[illegible]	97.516	130.113	28.457	12.193	16.264	8	5	1.720.000	169.706	74.217	95.489	33.941	14.843	19.098
Billom (chemin de) : Vertaizon à Billom. — *Puy-de-Dôme*	9	9	1.305.722	[illegible]	48.506	31.221	8.859	5.390	3.469	9	9	1.250.000	75.722	51.828	23.894	8.414	5.759	2 635
Boisleux à Marquion (d). — *Pas-de-Calais*	21	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Bouches-du-Rhône (chemins des) : Arles à Fontvieille. — Le Pas-des-Lanciers à Martigues. — Tarascon à Saint-Remy. — *Bouches-du-Rhône*	44	44	»	[illegible]	150.291	6.026	3.553	3.416	137	44	44	»	159.832	155.550	4.282	3.633	3.535	98
Briouze à la Ferté-Macé. — *Orne*	14	14	2.800.000	[illegible]	61.392	72.336	9.552	4.385	5.167	14	14	2.800.000	119.922	76.600	43.322	8.566	5.471	3.095
Caen à la mer : Caen à Courseulles. — *Calvados*	28	28	4.238.175	[illegible]	226.314	84.773	11.110	8.083	3.027	28	28	4.238.175	297.264	206.775	90.489	10.617	7.385	3.232
Crécy-Mortiers à la Fère : Crécy-Mortiers au Port-Sec de Pouilly (e). — *Aisne*	6	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Dombes et Sud-est : Ambérieu à Montalieu-Vercieu. — *Ain et Isère*	18	18	2.409.289	[illegible]	96.832	86.242	10.171	5.380	4.791	18	18	2.406.170	194.173	98.443	95.730	10.787	5.469	5.318
Chalon à Lons-le-Saunier et Chalon à Bourg. — *Ain, Jura et Saône-et-Loire*	127	126	12.904.656	[illegible]	601.945	154 803	6.006	4.777	1.229	65	66	6.465.835	481.011	325.847	155.164	7.288	4.937	2 351
Paray-le-Monial à Mâcon. — *Saône-et-Loire*	77	78	8.901.6[illegible]	[illegible]	513.757	160.325	8.612	6.587	2.055	77	78	8.901.645	706.906	522.878	184.028	9.063	6.704	2.359
Épernay à Romilly. — *Aube et Marne*	(b) 84	81	(f) 10.251.221	[illegible]	1.601.082	— 760.137	10.011	19.060	— 9.049	84	81	(f) 10.243.141	791.567	1.238.402	— 446.835	9.423	14.743	— 5.320
Est (compagnie de l') : Pont-Maugis à Raucourt. — *Ardennes*	(b) 9	10	686.219	[illegible]	54.532	— 1.795	5.273	5.453	— 180	9	10	686.219	51.700	58.429	— 6.729	5.170	5.843	— 673
Falaise à Berjou-Pont-d'Ouilly (g). — *Calvados, Orne*	28	29	6.407.600	[illegible]	»	»	2.032	»	»	28	29	6.407.400	71.000	220.629	— 149.629	2.448	7.608	— 5.160
Frévent à Gamaches : Doullens à Gamaches. — *Seine-Inférieure et Somme*	74	74	14.115.741	[illegible]	325.800	108.079	5.863	4.103	1.460	74	74	14.600.000	437.472	322.544	114.928	5.912	4.359	1.553
Gray à Gy et à Bucey-lès-Gy (*). — *Haute-Saône* (h)	22	17	3.225.153	[illegible]	66.018	25.354	5.375	3.883	1.492	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Hérault (chemins de l') : Saint-Chinian à Montbazin. — Montpellier à Palavas. — *Hérault*	95	98	(i) »	[illegible]	753.527	250.969	10.250	7.689	2.561	95	87	»	679.998	612.087	67.911	7.816	7.035	781
Lisieux à Orbec. — *Calvados*	18	19	2.850.805	[illegible]	227.213	— 117.536	5.772	11.959	— 6.187	18	19	2.850.805	115.905	229.613	— 113.708	6.100	12.085	— 5.985
Loire et Haute-Loire (compagnie des chemins de) : Bonson à Saint-Bonnet-le-Château. — *Loire*	27	27	»	[illegible]	128.076	— 19.423	4.024	4.744	— 720	27	27	»	112.898	111.806	1.092	4.181	4.441	40
Lorraine (chemins de la) : Nancy à Château-Salins, à la frontière et vers Vic. — *Meurthe-et-Moselle*	(b) 21	37	»	[illegible]	488.785	— 329.302	4.310	13.210	— 8.900	24	37	(j) 4.385.000	163.291	486.779	— 323.488	4.413	13.156	— 8.743
Lyon à Fourvières et Saint-Just (k). — *Rhône*	1	1	3.231.124	[illegible]	51.375	39.791	91.166	51.375	39.791	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Magny à Chars. — *Oise et Seine-et-Oise*	11	12	1.593 071	[illegible]	84.415	24.591	9.084	7.035	2.049	11	12	1.591.353	110.116	85.087	25.029	9.176	7.091	2.085
Mamers à Saint-Calais. — *Sarthe*	77	77	7 732.150	[illegible]	304.554	42.135	4.502	3.955	517	77	77	7.364.099	327.953	296.331	31.622	4.259	3.848	411
Meuse (chemins de la) : Haironville à Triaucourt. — *Meuse*	(l) »	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
Nançois-le-Petit à Gondrecourt. — *Meuse*	(b) 35	35	5.918.915	[illegible]	146.712	11.223	4.512	4.192	320	35	35	5.918.172	146.260	149.228	— 2.968	4.179	4.264	— 85
Nancy à Vezelise et embranchement de Tantonville. — *Meurthe-et-Moselle*	34	33	3.693.206	[illegible]	444.815	— 75.194	11.204	13.479	— 2.278	34	33	3.622.786	363.152	395.480	— 32.328	11.005	11.984	— 979
Nizau à Saint-Symphorien et à Sore (*). — *Landes, Gironde*	32	31	2.600.120	[illegible]	86.291	22.765	3.518	2.784	734	32	31	2.561.818	95.489	89.039	6.450	3.080	2.872	208
Nord (compagnie du) : Saint-Omer-en-Chaussée à Abancourt. — Beauvais à Saint-Just. — Breteuil (ville) à Breteuil (station). — Gisors à Beauvais. — La Rue St-Pierre à Clermont. — *Oise*	102	101	15.713.146	[illegible]	791.045	— 122.975	6.644	7.862	— 1.218	94	94	12.354.936	650.158	767.126	— 116.968	6.917	8.161	— 1.244
Doullens à Arras. — Frévent à Bouquemaison. — Bully-Grenay à Brias (*). — *Pas-de-Calais*	65	15	8.654.839	[illegible]	334 268	— 97.667	5.258	7.428	— 2.170	35	38	3 641.978	191.214	309.542	— 118.328	5.032	8.146	— 3.114
Doullens à Bouquemaison. — Canaples à Amiens (*). — *Somme*	40	37	7.249.787	[illegible]	294.347	— 94.311	5.406	7.955	— 2.549	40	13	6.606.406	85.871	130.033	— 44.162	6.605	10.003	— 3.398
Ermont à Valmondois. — *Seine-et-Oise*	15	15	»	[illegible]	(m) »	»	9.913	»	»	15	15	»	141.513	(m) »	»	9.434	»	»
Orléans à Châlons : Lignes du département de l'Eure. — *Eure, Oise, Seine-et-Oise*	227	(n) 236	»	[illegible]	»	»	6.424	»	»	227	(o) 236	»	[illegible]278.552	(p) 1.216.013	62.539	5.418	5.153	265
Orne (chemins de l') : Alençon à Condé-sur-Huine. — *Orne*	66	67	10.292.209	[illegible]	265.137	70.665	5.012	3.957	1.055	66	67	10.292.209	355.099	258.118	96.981	5.300	3.852	1.448
Paris à Orléans : La Flèche à Sablé et la Flèche à la Suze. — *Sarthe*	51	54	7.517.577	[illegible]	336.918	— 215.990	2.239	6.239	— 4.000	51	»	»	»	»	»	»	»	»
Picardie et Flandres : Saint-Just à Cambrai (*). — *Nord, Oise et Somme*	114	115	20.481.352	[illegible]	702.717	375.352	9.375	6.111	3.264	114	115	20.428.600	866.734	763.141	103.593	7.537	6.636	901
Quentin (Saint-) à Guise (*). — *Aisne*	40	40	5.597.705	[illegible]	285.674	224.906	12.761	7.142	5.622	40	40	5.513.850	445.307	268 069	177.238	11.133	6.702	4.431
Rambervillers à Charmes. — *Vosges*	(b) 28	28	2.103.262	[illegible]	112.000	37.153	5.326	4.000	1.326	28	28	»	145 950	112.000	33.950	5.212	4.000	1.212
Rouen au Petit-Quévilly (q). — *Seine-Inférieure*	3	3	281.360	[illegible]	41.886	4.662	15.516	13.962	1.554	3	3	281.360	64.002	71.343	— 7.341	21.334	23.781	— 2.447
Seudre (compagnie de la) : Pons à la Tremblade. — Saujon à Royan. — *Charente-Inférieure*	69	71	7.266.629	[illegible]	446 439	— 80.258	5.158	6.288	— 1.130	69	71	7.129.127	352.986	438.427	— 85.441	4.972	6.175	— 1.203
Teste (la) à l'Étang de Cazeaux. — *Gironde*	13	13	1.403.185	[illegible]	45.095	— 17.099	2.454	3.469	— 1.345	13	13	800.000	29.458	»	»	2.266	»	»
Tréport (le) à Abancourt. — *Oise, Seine-Inférieure, Somme*	57	57	19.932.323	[illegible]	296.732	272.382	9.984	4 779	5.205	57	57	10.726.258	539.136	293.077	245.059	9.444	5.112	4.299
Vallée de la Suippe (chemin de la) : Bazancourt à Bétheniville. — *Marne*	(b) 17	17	1.080.087	[illegible]	86.912	8.564	5.616	5.112	504	17	17	1.080.087	94.020	79.280	14 740	5.531	4.664	867
Vosges (chemin des) : Arches à Saint-Dié. — Granges à Gérardmer (*). — *Vosges*	72	69	15.766.046	[illegible]	353.478	189.290	7.866	5.123	2.713	59	63	12.539.446	193.194	316.258	176.936	7.828	5.020	2.808
Totaux et moyennes.	2.049 (r)	1.968	214.474.846 (s)	[illegible]	14.360.190 (t)	661.316 (t)	7.203	6.807	396	1.841	1.774	182.648.920 (s)	11.817.708 (t)	11.237.259 (t)	580.449 (t)	6.843	6.507	336

OBSERVATIONS. (20)

Nota. — Les Compagnies marquées d'un astérisque sont tenues, aux termes de leurs actes de concession, de fournir aux préfets les résultats trimestriels de leur exploitation. L'Administration a fait inviter les autres Compagnies à produire des renseignements analogues.

Les chiffres des colonnes 3 et 12 comprennent les parcours communs.

Les chiffres des colonnes 4 et 13 représentent la totalité des dépenses faites tant à l'aide des fonds des Compagnies que sur les subventions allouées par l'État, les départements et divers.

A moins d'une observation [illegible]traire, ces chiffres comprennent le matériel roulant, les intérêts pendant la construction, etc.; enfin les chiffres des colonnes 5 et 14 sont donnés déduction faite des détaxes et des impôts sur les transports.

(a) Les nombres portés dans les colonnes 4 à 10 se rapportent seulement à la section d'Achiet à Bapaume. — La section de Bapaume à Marcoing (24 kilom.) a été exploitée au compte de premier établissement jusqu'au 31 décembre 1878.

(b) Lignes exploitées par la Compagnie de l'Est.

(c) Pour l'année 1877, la m[illegible] en service n'a eu lieu qu'à partir du 2 juin.

(d) La Compagnie ne peut [illegible]ournir de renseignements, attendu qu'elle a exploité jusqu'au 31 décembr[illegible] 1878 au compte de la construction.

(e) La Compagnie ne peut fournir de renseignements, la ligne n'étant pas ouverte au service du public.

(f) Non compris le matériel roulant appartenant à la Compagnie de l'Est.

(g) La ligne de Falaise à [illegible]erjou-Pont-d'Ouilly est exploitée par la Compagnie de l'Ouest depuis le [illegible]er janvier 1878. — Les recettes du mois de décembre ne sont qu'approximatives.

(h) Chemin à voie étroite.

(i) Les comptes de dépens[illegible] de premier établissement ne sont pas ouverts par section de ligue, [illegible]ais par ligne. Il en résulte que le chiffre des dépenses d'établissement à a[illegible]cter d'une façon spéciale et distincte aux seules sections ouvertes au 31 décembre 1878 ne peut être fourni.

(j) Cette somme représente le coût des travaux, non compris la valeur des terrains qui ont été acqu[illegible] par le département, et les travaux de raccordement des routes, chemin[illegible]cours d'eau, également à la charge du département.

(k) La ligne de Lyon à Fo[illegible]ères et Saint-Just a été livrée à l'exploitation le 7 août 1878.

(l) Exploitation provisoire sur 10 kilomètres.

(m) La Compagnie du Nor[illegible] n'est pas en mesure de fournir les dépenses d'exploitation.

(n) Dont 225 kilomètres ap[illegible]artenant à la Compagnie d'Orléans à Châlons et 11 kilomètres aux chemins de fer de l'État.

(o) Dont 225 kilomètres ap[illegible]artenant à la Compagnie d'Orléans à Châlons et 11 kilomètres à celle d'Orl[illegible]ans-Rouen.

(p) Le chiffre de 1,216.01[illegible] représente des dépenses du 1er mars au 31 décembre 1877, la ligne a[illegible]ant été exploitée pendant les deux premiers mois par la Compagnie d'Orl[illegible]ans à Rouen.

(q) Le chemin de Rouen [illegible]u Petit-Quevilly n'est à proprement parler qu'un chemin industriel desservant l'usine Malétra.

(r) Les sections livrées à l'exploitation du 1er janvier au 31 décembre 1878 ont une étendue de 208 kilomètres, savoir :

	kil.	kil.
Achiet à Bapaume : Havrinc[illegible]urt à Marcoing (Nord et Pas-de-Calais), le 10 mars 1878	»	7
Argonne (chemin de l') : Vou[illegible]ziers à Apremont (Ardennes), le 25 novembre 1878	»	38
Boisleux à Marquion : Boisleux à C[illegible]oisilles (Pas-de-Calais), le 21 janvier 1878	10	21
Boisleux à Marquion : Croisilles à [illegible]uchy (Pas-de-Calais), le 1er juin 1878	11	
Crécy-Mortiers à la Fère : Crécy-Mortiers au Port-Sec de Pouilly (Aisne), le 30 ao[illegible] [illegible]878	»	6
Dombes et Sud-Est : Bourg [illegible] Chalon (Ain et Saône-et-Loire), le 19 janvier 1878	»	62
Gray à Gy et à Bucey-lez-Gy [illegible]Haute-Saône), le 5 mai 1878	»	22
Lyon à Fourvières et Saint-Ju[illegible]t (Rhône), le 7 août 1878	»	1
Meuse (chemin de la) : Couvong[illegible]es à Révigny-aux-Vaches (Meuse), (10 kil.), le 11 juillet 1878. ([illegible]our mémoire.)	»	»
Nord : La Rue-Saint-Pierre à Clermont (Oise), le 2 février 1878	8	38
Nord : Bully-Grenay à Brias (Pas-de-Calais), le 1er octobre 1878	30	
Vosges (chemins des). Gran[illegible]es à Gérardmer (Vosges), le 29 juin 1878	»	13
Ensemble		208
Longueur exploitée au 31 décembre 1877		1.841
Longueur exploitée au 31 décembre 1878		2.049

(s) Pour une longueur totale de 1.461 kil. en 1878, et de 1.324 kil. en 1877.

(t) Pour une longueur moy[illegible]nne de 1.669 kil. en 1878, et de 1.727 kil. en 1877.

N° 54

ÉTUDE DE QUELQUES QUESTIONS

RELATIVES

AUX EAUX COURANTES

DANS LA PARTIE SUPÉRIEURE DU BASSIN DE LA SAONE

Par M. Charles MOCQUERY,
Ingénieur des ponts et chaussées.

Nous avons réuni sous ce titre quelques recherches auxquelles nous nous sommes livré sur le régime de la Saône supérieure, et qui, par la nature des résultats obtenus, pourront peut-être être généralisées et appliquées à d'autres rivières à *faible pente.*

Nous divisons ce mémoire en trois parties, qui n'ont d'autre lien commun que celui d'être toutes relatives à l'étude de la Saône.

Les trois questions étudiées sont les suivantes :

1° *Des relations qui lient le débit de la rivière aux différents éléments observés;*

2° *Du rapport entre la quantité d'eau tombée sur le bassin et celle débitée par la rivière;*

3° *De la variation de hauteur d'une même crue se propageant dans une section de rivière ne recevant pas d'affluents importants.*

1° Des relations qui lient le débit de la rivière aux différents éléments observés.

Vers 1860, M. C. Joly, conducteur des ponts et chaussées, a mesuré, sous la direction de M. l'ingénieur en chef

Bénard, le débit de la Saône à différentes hauteurs d'eau, en face du village de Mercey-sur-Saône (Haute-Saône), où la rivière présente sur environ 1 kilomètre de longueur une direction rectiligne et une section sensiblement constante. Cette portion de la Saône est comprise entre les bornes $307^k,8$ et $308^k,8$. (Le kilométrage part du pont de la Mulatière, à Lyon, et remonte la rivière).

Une échelle hydrométrique avait été placée vers le milieu de la partie rectiligne soumise aux observations, et son zéro était exactement au niveau de celui de l'échelle d'aval de l'écluse de Savoyeux, située à environ 1.500 mètres plus bas, et dont la cote est de $192^m,001$ au-dessus du niveau de la mer. (Nivellement Bourdaloue).

Les jaugeages ont été faits à l'aide de flotteurs plongeants de différentes hauteurs, et les débits calculés d'après une formule établie par M. l'ingénieur en chef Bénard, et qui est la suivante :

$$U = u \frac{0,84}{1 - 0,16 \frac{h^2}{H^2}}.$$

dans laquelle U est la vitesse moyenne de la rivière, u la vitesse du flotteur observée dont la hauteur est h, et enfin H représente la profondeur totale de la rivière.

Chaque flotteur se composait d'un tube de zinc de 2 ou 3 centimètres de rayon, lesté à sa partie inférieure de manière à immerger sur toute sa hauteur en se maintenant dans une position verticale.

Les expériences ont été faites avec beaucoup de soin, par des temps calmes, et méritent toute confiance. Elles ont d'ailleurs été décrites par M. Joly, dans les *Annales des conducteurs des ponts et chaussées* de l'année 1861.

Le tableau suivant donne les résultats obtenus :

Tableau des débits de la Saône à Mercey aux différentes hauteurs de l'échelle hydrométrique.

HAUTEURS à l'échelle.	DÉBITS.	HAUTEURS à l'échelle.	DÉBITS.	HAUTEURS à l'échelle.	DÉBITS.	HAUTEURS à l'échelle.	DÉBITS.
mètres.	mèt. c.	mètres.	mèt. c.	mètres.	mèt. c.	mètres.	mèt. c.
0,00	4,93	0,64	47,73	1,50	124,80	2,14	201,00
0,05	10,66	0,66	53,89	1,57	128,11	2,18	182,79
0,06	9,14	0,73	59,50	1,63	135,13	2,21	184,62
0,12	15,05	0,75	58,13	1,72	146,25	2,28	193,72
0,13	11,33	0,85	71,11	1,74	149,55	2,29	207,87
0,14	13,16	0,87	65,45	1,76	150,32	2,31	205,00
0,18	20.55	0,91	72 90	1,80	155 81	2,43	215,65
0,20	21,03	0,93	75,79	1,81	157,26	2,51	208,02
0,27	25 96	1,06	81,58	1,82	158,34	2,68	235,60
0,29	24,86	1,07	89,70	1,87	148,48	2,73	264,01
0,32	29,11	1,11	94,28	1,95	166 63	2,80	246,99
0,34	28,90	1,16	84,57	1,98	178,94	2,85	305,27
0,36	28,68	1,17	94,03	2,00	176,09	3,10	393,15
0,42	33,68	1,21	96,11	2,01	163,70	3,33	469,34
0,45	34,11	1,25	100,63	2,02	184,35	3,53	559,25
0,46	41,31	1,33	111,43	2,05	187,60	3,57	564,06
0,56	49,02	1,40	119,63	2,08	183,55	3,62	563,60
0,57	48,16	1,42	112,85	2,09	154,54	»	»
0,58	47,55	1,46	124,20	2,11	178,56	»	»
0,62	49,61	1,47	121,96	2,13	188,19	»	»

Si l'on porte en abscisses les hauteurs de l'eau au-dessus du zéro de l'échelle et en ordonnées les débits correspondants de la rivière, on remarquera que les points ainsi obtenus affectent une forme régulière, et que la moyenne des résultats obtenus est parfaitement représentée par une parabole dont l'équation est (Pl. 21, *fig.* 8) :

(1) $$Q = 8.194\,H^2 + 66.129\,H + 5.719,$$

dans laquelle Q est le débit en mètres cubes par seconde et H la hauteur en mètres au-dessus du zéro de l'échelle.

Néanmoins il est facile de voir qu'au delà de $H = 2^m,68$, la courbe s'éloigne nettement des résultats de l'expérience, et que les débits croissent beaucoup plus rapidement que ne l'indiquerait la formule ci-dessus. Si l'on cherche comme précédemment à représenter les résultats des expériences par une ligne continue, on reconnaîtra que la droite :

(2) $$Q = \frac{H - 2\ 00}{0,0028},$$

satisfait très-bien aux conditions du problème.

Cette anomalie s'explique d'ailleurs facilement. A la cote $2^m,68$ le débordement commence; il en résulte une augmentation brusque de la section d'écoulement qui fait que les débits croissent beaucoup plus vite pour un même accroissement de hauteur que lorsque les eaux sont contenues tout entières dans le lit de la rivière.

Il est fort probable que la loi de variation parabolique, trouvée dans le premier cas, subsiste encore ici, et que si l'accroissement des débits est suffisamment représenté par une ligne droite, cela tient, d'une part, au trop petit nombre d'expériences faites à ces grandes hauteurs de crues, et en second lieu, à ce que l'arc de parabole considéré étant fort éloigné du sommet et relativement court, se confond sensiblement avec une ligne droite.

Si l'on déplace le zéro de l'échelle hydrométrique de $0^m,088$ en contre-bas de la position qu'il occupait pendant les expériences, l'équation (1) devient :

$$(3) \qquad Q = 64.687\,H + 8.194\,H^2.$$

Le zéro de l'échelle correspond ainsi au fond du lit, supposé réglé horizontalement dans la section transversale. Le débit s'annule alors naturellement avec H. Cette dernière relation ne dépend plus d'un zéro arbitraire.

Si l'on remarque que le coefficient de H est sensiblement égal au carré du coefficient de H^2, l'équation prend la forme homogène très-simple :

$$(4) \qquad Q = \alpha^2 H + \alpha H^2,$$

ce qui signifie que :

Les débits Q *de la rivière à Mercey, sont une fonction parabolique du second degré de la hauteur* H *au-dessus du fond du lit, dans laquelle le coefficient de* H *est le carré de celui de* H^2.

Il est évident que la constante α varie avec la section et

la pente, et qu'elle n'est constante qu'en un point donné du cours d'eau.

Pendant les expériences que nous venons d'analyser on observait non-seulement l'échelle établie spécialement à cet effet à Mercey, mais encore l'échelle hydrométrique placée à l'aval de l'écluse de Savoyeux, qui fait partie du système des observations quotidiennes du service spécial de la Saône. Les zéros de ces deux échelles étaient exactement de niveau, ainsi que nous l'avons dit plus haut. Il nous a paru intéressant de comparer les observations simultanées aux deux échelles qui, par différence, donnaient la pente de la rivière. Nous avons pu trouver, de cette manière, la loi de variation de cette pente avec la hauteur H.

Le tableau suivant donne les résultats de cette comparaison.

Tableau comparatif des cotes aux échelles de Mercey et de Savoyeux.

COTES A		COTES A		COTES A		COTES A	
Mercey.	Savoyeux.	Mercey.	Savoyeux.	Mercey.	Savoyeux.	Mercey.	Savoyeux.
mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.	mètres.
0,00	0,00	0,64	0,60	1.50	1,41	2,14	2,02
0,05	0,05	0,66	0,62	1,57	1,48	2,18	2,05
0,06	0,06	0,73	0,69	1,63	1,54	2,21	2,08
0,12	0,11	0,75	0,71	1,72	1,62	2,28	2,15
0,13	0,12	0,85	0,80	1,74	1,64	2,29	2,16
0,14	0,13	0,87	0,82	1,76	1,65	2,31	2,18
0,18	0,17	0,91	0,86	1,80	1,70	2,43	2,29
0,20	0,19	0.93	0,88	1,81	1,72	2,51	2,36
0,27	0,26	1,06	1,00	1,82	1,71	2,68	2,52
0,29	0,27	1,07	1,01	1,86	1,75	2,73	2,57
0,32	0,30	1,11	1,04	1,95	1,84	2,80	2,64
0,34	0,32	1,16	1,09	1,98	1,87	2,85	2,68
0,36	0,34	1,17	1,10	2.00	1,88	3,10	2,92
0.42	0,40	1,21	1,14	2,01	1,89	3,33	3,14
0 45	0,42	1,25	1,18	2,02	1,90	3,53	3,32
0,46	0,43	1,33	1,25	2 05	1,93	3,57	3,36
0,56	0,53	1,40	1,31	2,08	1,96	3,62	3,41
0,57	0,54	1,42	1,34	2,09	1,97	»	»
0,58	0,55	1,46	1,37	2,11	1,99	»	»
0,62	0,58	1,47	1,38	2,13	2,01	»	»

Si maintenant nous portons, comme précédemment, en abscisses les cotes H lues à l'échelle de Mercey, et en or-

données les cotes H′ lues à celle de Savoyeux, et que nous traçions la ligne représentant le plus exactement ces résultats, nous remarquerons que cette ligne est une droite dont l'équation est :

$$(5) \qquad H' = 0{,}942\ H.$$

Cette droite est tracée en pointillé sur la *fig.* 8, et les points se confondent absolument avec elle.

En appelant D la distance qui séparait les deux échelles, distance que, malheureusement, nous n'avons pu trouver dans le dossier des expériences, et I, la pente de la rivière entre ces deux points, nous aurons :

$$(6) \qquad I = \frac{H - H'}{D} = \frac{0{,}058}{D} H = \beta H.$$

On en conclut que : *la pente de la rivière est proportionnelle à la hauteur de l'eau dans le lit supposé régulier entre les points considérés.*

Il est assez curieux de remarquer que les résultats exprimés par les équations (4) et (6) sont en concordance avec la formule anciennement adoptée par les ingénieurs italiens :

$$(7) \qquad V = K\sqrt{RI}.$$

Si l'on suppose, en effet, la rivière suffisamment large par rapport à sa profondeur, on peut admettre sans erreur sensible, $R = H$, et l'équation (7) combinée avec l'équation (6) donne alors :

$$(8) \qquad V = \lambda H.$$

D'un autre côté l'équation (4) peut s'écrire :

$$Q = \alpha H (H + \alpha),$$

ou bien encore :

$$Q = \delta L.H (H + \alpha),$$

et, comme on a également :

$$Q = LHV.$$

on en tire :

(9) $$V = \delta(H + \alpha).$$

Les équations (8) et (9) expriment donc toutes deux que : *La vitesse moyenne varie proportionnellement à la hauteur de l'eau au-dessus du fond du lit.*

2° Du rapport entre la quantité d'eau tombée sur le bassin et celle qui est débitée par la rivière.

Le service de la Saône possède des observations hydrométriques et udométriques fort complètes qu'il nous a paru intéressant d'utiliser pour connaître le rapport entre la quantité d'eau tombée sur le bassin et le volume débité par la rivière. A cet effet, nous avons commencé par mesurer la superficie du bassin de la Saône et de ses affluents en amont de Savoyeux, puis nous avons calculé la quantité d'eau tombée sur ces divers bassins à l'aide des observations udométriques, et nous avons trouvé ainsi, avec une approximation très-suffisante, le volume total tombé sur cette étendue pendant les dix années de 1858 à 1867 inclusivement. Nous avons pu calculer également à l'aide des observations hydrométriques faites pendant les mêmes années à l'échelle d'aval de l'écluse de Savoyeux, et des expériences relatives aux débits correspondants relatées plus haut, le volume débité annuellement par la rivière pendant le même laps de temps. En divisant ce deuxième résultat par le premier, nous avons naturellement obtenu le rapport cherché.

La carte (*fig.* 6) donne une idée du bassin de la Saône en amont de Savoyeux, et de ses divisions en bassins secondaires ; elle indique en même temps l'emplacement des udomètres. Quelques-uns d'entre eux sont placés de telle

sorte qu'ils donnent assez exactement la quantité d'eau tombée sur toute l'étendue du bassin d'un affluent, les bassins étant fort petits dans les régions supérieures. Pour d'autres, au contraire, il n'en est plus ainsi, et nous avons dû, pour certains ruisseaux, combiner les indications de deux et même jusqu'à trois udomètres, en les affectant d'un coefficient que nous avons déterminé en raison de la surface du bassin rayonnant autour de l'udomètre considéré combinée avec le relief du sol. On sait en effet que la quantité de pluie tombée dépend d'une façon très-remarquable de la hauteur au-dessus du niveau de la mer, et que, toutes choses égales d'ailleurs, plus l'udomètre est élevé, plus il reçoit d'eau. Néanmoins, comme il est fort difficile d'évaluer le rayon d'action d'un udomètre, nous nous sommes attaché à n'employer que des coefficients simples, car il eût été puéril de vouloir préciser davantage.

Le tableau suivant donne pour chaque affluent la hauteur d'eau tombée sur son bassin pendant les dix années de 1858 à 1867 inclusivement, ainsi que l'étendue du bassin exprimée en kilomètres carrés, et enfin les noms et les coefficients des udomètres consultés :

Tableau des hauteurs d'eau tombées sur les bassins.

NOMS des bassins.	RIVES des bassins.	SUPERFICIE des bassins.	UDOMÈTRES consultés,	COEFFICIENTS.	HAUTEURS D'EAU TOMBÉES EN 1858	1859	1860	1861	1862	1863	1864	1865	1866	1867	OBSERVATIONS.
		kil. q.			mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	mèt.	
Saône supre. .	»	426	Vioménil Frain Corre	1/3 1/3 1/3	0,7783	0,8589	1,1750	0,6880	0,8803	0,9376	0,6711	0,6613	1,4422	0,9278	Les lettres D et G indiquent que le bassin considéré est sur la rive droite ou sur la rive gauche de la Saône.
Apance	D	203	Frain Corre	1/2 1/2	0,7781	0,8318	1,1592	0,6846	0,8339	0,9245	0,6248	0,6430	1,0824	0.8809	
Coney	G	498	Vioménil Plombières Corre	1/3 1/3 1/3	0,9490	1,0811	1,3404	0,8473	0,8538	0,9045	0,6564	0,6688	1,3605	1,1089	
Amance	D	489	Faye-Billot Corre	1/2 1/2	0,8342	0,8399	1,1787	0,6861	0,8508	0,9482	0,6183	0,6956	1,1246	0,9051	
Ougeotte. . . .	D	132	Faye-Billot Corre	1/2 1/2	0,8342	0,8399	1,1787	0,6861	0,8508	0,9482	0,6183	0,6956	1,1246	0,9051	
Magny.	G	91	Corre	1	0,8435	0,8699	1.2700	0,7346	0,8725	0,9892	0,5880	0,6185	1,0998	0,9028	
Superbe	G	101	Corre Conflans	1/2 1/2	0,7305	0,7287	1,0309	0,6260	0,8104	0,8416	0,5765	0 6145	1,0095	0,8171	
Lanterne. . . .	G	1.051	Plombières Faucogney Conflans	1/3 1/3 1/3	1,0525	1,2028	1,3296	0,9406	0,9753	0,9572	0,7508	0,8045	1,5131	1,2367	
Scyote	G	49	Vesoul	1	0,5556	0,7809	0,8271	0,6216	0,4229	0,6496	0,5170	0,5440	1,0969	0,9362	
Durgeon. . . .	G	450	Vesoul	1	0,5556	0,7809	0,8271	0,6216	0,4229	0,6496	0,5170	0,5440	1,0969	0,9362	
Vy-le-Ferroux.	G	37	Charentenay	1	0,8043	1,0680	1,3128	0,6877	0,8382	0,8385	0,8252	0,8526	1,0653	0,9797	
Confracourt. .	D	168	Combeaufontaine	1	0,8358	1,0101	1,4230	0,7940	1,0472	1,0773	0,7357	0,8691	1,3917	1,0680	
Romaine. . . .	G	244	Grandvelle Charentenay	2/3 1/3	0,9148	1,0197	1,2908	0,7344	0,8796	0,9736	0,7531	0,7961	1,1555	0,9459	
Gourgeonne. .	D	185	Combeaufontaine Charentenay	1/2 1/2	0,8200	1,0390	1,3679	0,7408	0,9427	0,9579	0,7804	0,8608	1,2285	1,0238	
Vannon	D	175	Faye-Billot Charentenay	1/2 1/2	0,8146	0,9390	1,2001	0,6626	0,8337	0,8728	0,7369	0,8127	1,1073	0,6436	
Total et moyennes.	. . . . .	4.299	. . . .	. .	0,8633	0,9806	1,2168	0,7676	0,8460	0,9098	0,6765	0,7178	1,2525	1,0283	Moyenne générale. 0m.9259

Les moyennes ont été obtenues en divisant les totaux du tableau suivant par la surface générale du bassin, qui est de 4.299 kilomètres carrés; les moyennes arithmétiques n'auraient eu évidemment aucune signification. Les moyennes qui figurent au tableau qui précède représentent donc exactement les hauteurs d'eau tombées sur le bassin total considéré, en supposant une égale répartition des pluies.

Le tableau suivant obtenu en multipliant les hauteurs d'eau tombées sur chaque bassin particulier, par la superficie de ce bassin, donne les valeurs d'eau tombées annuellement sur les superficies considérées, exprimés en milliers de mètres cubes :

Tableau des volumes d'eau tombés sur les bassins.

NOMS des bassins.	SUPERFICIE des bassins.	VOLUMES D'EAU TOMBÉS EN 1858	1859	1860	1861	1862	1863	1864	1865	1866	1867	VOLUMES moyens.
	kil. q.											
Saône supérieure.	426	331.756	365.891	500.550	293.088	375.008	399.418	285.889	281.714	486.577	395.243	371.513
Apance.	203	157.954	168.855	235.318	138.974	169.282	187.674	126.834	130 529	219.727	178.823	171.397
Coney.	498	472.602	538.388	667.519	421.955	425.192	450.441	326.887	333.062	677.529	552.232	486.581
Amance	489	407.435	410.711	576.384	335.503	416.041	463.670	317.019	340.148	549 929	452.594	425.943
Ougeotte	132	110.114	110.867	155.588	90.565	112.306	125.162	81.616	91.819	148.447	119.473	114.596
Magny	91	76.759	79.161	115.570	66.849	79.398	901·017	53.508	56.284	100.082	82.155	79.978
Superbe	101	73.781	73 599	104.121	63.226	81.850	85.002	58.227	62.065	101.960	88.527	78.636
Lanterne.	1.051	1.106.178	1.264.143	1.397.410	988.571	1.025.040	1.006.017	789.091	845.530	1.590.268	1.299.772	1.131.202
Scyote	49	27.224	38.264	40.528	30.458	20.722	31.830	25.333	26.656	53 748	45.874	34.064
Durgeon	450	250.020	351.405	372.195	279.720	190.305	292.320	232.650	244 800	493.605	421.290	312.831
Vy-le-Ferroux . . .	37	29.759	39.516	48.574	25.445	31.013	31.025	30.532	31.546	39.416	36.249	34.308
Confracourt	168	140.414	169.697	239.064	133.392	175.930	180.986	123.598	146.009	233.806	179.424	172.232
Romaine	244	233.211	248.717	314.955	179.194	214.622	237.558	183.756	194.248	281.912	230.800	231.900
Gourgeonne	185	151.700	192.215	253.062	137.048	174.400	177.212	144.374	159 248	213.768	189.403	179.243
Vannon.	175	142.555	164.325	210.018	115.955	145.898	152.740	128.958	142.223	193.778	165.130	156 158
Totaux. . .	4.299	3.711.462	4.215.754	5.230.856	3.299.943	3.637.007	3.911.072	2.908.272	3.085.881	5.304.582	4.420.989	3.980.582

Ce tableau montre que la quantité d'eau tombée peu varier du simple au double entre une année sèche, comm 1864, et une année très-humide, comme 1866.

Nous allons chercher maintenant les volumes débités pa la Saône pendant les mêmes années. A cet effet, dans l tableau suivant, nous donnerons le résumé des observation hydrométriques faites à l'échelle d'aval de l'écluse de Sa voyeux. Les cotes d'eau y ont été inscrites de $0^m,10$ e $0^m,10$ pour simplifier le tableau, en forçant ou en diminuan la cote du registre, suivant que le chiffre des centimètre est ou non supérieur à 5.

TABLEAU RÉSUMÉ

DES

OBSERVATIONS HYDROMÉTRIQUES DE SAVOYEUX.

Tableau résumé des obs

ANNÉES. d'observations.	NOMBRES DE JOURS PENDANT																		
	—0^{m},50	—0^{m},40	—0^{m},30	—0^{m},20	—0^{m},10	0^{m},00	0^{m},10	0^{m},20	0^{m},30	0^{m},40	0^{m},50	0^{m},60	0^{m},70	0^{m},80	1^{m},90	1^{m},00	1^{m},10	1^{m},20	1^{m},30
1858	»	»	1	5	7	121	98	42	22	18	9	10	3	5	3	»	1	2	1
1859	»	»	»	»	»	73	56	67	32	31	19	12	9	9	10	7	7	3	2
1860	»	»	»	»	»	19	24	37	36	29	19	22	16	19	23	14	15	11	13
1861	1	1	2	3	19	96	47	38	29	31	15	14	12	11	7	8	2	2	2
1862	»	»	»	»	»	25	121	57	25	27	20	26	13	7	7	6	4	4	3
1863	»	»	»	»	3	32	64	57	49	25	22	17	13	15	8	11	6	6	6
1864	»	»	»	9	7	82	66	43	34	31	25	16	14	5	8	4	4	»	6
1865	5	2	12	18	56	88	49	25	22	14	11	8	11	7	4	2	3	1	1
1866	»	»	»	»	»	2	37	39	42	26	21	23	23	25	13	17	11	13	12
1867	»	»	»	»	11	13	38	79	34	35	13	13	10	8	12	9	9	7	5
Totaux.	6	3	15	35	103	551	600	484	325	267	174	161	124	111	95	78	62	49	51

A l'aide du tableau ci-dessus et des formules donnée dans la première partie du mémoire, il est facile d'obteni le volume d'eau débité annuellement par la Saône à Savoyeux. Les résultats de ces calculs sont donnés dans l deuxième colonne du tableau suivant. Dans la troisièm colonne nous donnons la hauteur de l'eau à l'échelle, e admettant que la rivière ait constamment débité son volum moyen. Enfin, dans la quatrième colonne, nous avons in scrit le rapport entre le débit de la rivière et le volum d'eau tombé sur son bassin, qui fait l'objet de ces recherches.

étriques de Savoyeux.

X SE SONT MAINTENUES A LA COTE DE

$1^m,80$	$1^m,90$	$2^m,00$	$2^m,10$	$2^m,20$	$2^m,30$	$2^m,40$	$2^m,50$	$2^m,60$	$2^m,70$	$2^m,80$	$2^m,90$	$3^m,00$	$3^m,10$	$3^m,20$	$3^m,30$	$3^m,40$	$3^m,50$	$3^m,60$	$3^m,70$	$3^m,80$	$3^m,90$
1	3	»	»	»	»	2	»	»	»	»	1	»	»	2	»	»	»	»	»	»	»
1	1	3	3	»	3	»	»	1	»	1	»	»	»	»	1	1	»	»	»	»	1
3	7	6	3	3	1	2	4	2	4	1	2	1	»	»	»	2	»	»	»	»	»
1	1	1	»	2	2	»	2	»	»	1	1	»	»	»	1	»	»	»	1	»	»
2	»	1	1	»	»	1	1	1	1	1	»	»	»	»	1	»	»	»	»	1	»
1	2	2	2	4	2	»	2	1	»	»	2	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
1	2	1	»	»	»	»	1	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
»	1	2	1	»	3	1	3	»	»	2	3	»	»	1	»	»	»	»	»	»	»
5	4	4	3	7	3	1	1	»	1	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»	»
4	2	3	6	4	4	4	1	4	1	3	2	4	5	»	»	»	»	»	»	»	»
19	23	23	19	20	18	11	15	10	7	9	11	5	5	3	3	3	»	»	1	1	1

Tableau des rapports entre les volumes débités par la Saône à Savoyeux et ceux tombés sur son bassin.

ANNÉES.	VOLUMES débités en milliers de mètres cubes.	HAUTEURS correspondantes de l'eau à l'échelle.	RAPPORT entre l'eau débitée et l'eau tombée sur le bassin.	OBSERVATIONS.
	mètres.	mètres.	mètres.	Les hauteurs de la 3e colonne sont obtenues en divisant les volumes débités de la 2e colonne multipliés par 1.000, par 86.400 et le quotient par 365 ou 366, ce qui donne le débit moyen par seconde, et en calculant ensuite la hauteur correspondante à l'aide des formules données à la première partie.
1858	862.186	0,29	0,232	
1859	1.375.834	0,51	0,326	
1860	2 442 528	0,92	0,466	
1861	1.222.214	0,44	0,370	
1862	1.271.462	0,46	0,349	
1863	1.533 686	0,57	0,392	
1864	994.032	0,34	0,342	
1865	1.056.672	0,37	0,342	
1866	2,145.053	0,80	0,398	Les chiffres de la 4e colonne sont obtenus en divisant les nombres de la 2e colonne du présent tableau par les valeurs correspondantes du tableau de l'eau tombée sur le bassin.
1867	2.266.531	0,84	0,512	
Moyennes.	1.517.020	0,56	0,381	

Les rapports donnés par le tableau qui précède, sont assez concordants, et comme ils ont été calculés d'une manière indépendante, cela démontre qu'ils représentent les faits avec une exactitude suffisante. Bien plus, il est facile de voir que les différences entre les résultats obtenus

pour les différentes années sont rationnelles, et doivent nécessairement exister. D'où provient, en effet, cet écart considérable que nous constatons entre l'eau débitée par la rivière et celle tombée sur son bassin? Il vient de ce que la plus grande partie de l'eau des pluies est enlevée par l'évaporation et absorbée par la végétation. Ce qui reste coule à la surface et va alimenter les ruisseaux au moment même où la pluie tombe, ce qui cause les crues torrentielles, ou bien va s'infiltrer dans le sol et se concentre dans des réservoirs souterrains qui donnent naissance aux sources pérennes et fournissent aux rivières l'aliment de leurs débits tranquilles. On comprend dès lors aisément que, si l'année est très-pluvieuse, l'évaporation sera relativement moins forte que si l'année est sèche, et le soleil ardent; d'un autre côté, le volume d'eau absorbé par la végétation ne varie que d'une manière fort restreinte sur un sol où la culture est la même d'une année à l'autre. Il en résulte nécessairement que le rapport entre l'eau débitée par la rivière et celle tombée sur son bassin doit être d'autant plus grand que l'année a été plus humide, et cela ressort nettement du tableau qui précède.

Il y aurait maintenant à faire la part de l'évaporation et celle de la végétation dans cette énorme quantité d'eau qui n'arrive pas jusqu'à la rivière. Malheureusement les données manquent pour y parvenir. L'évaporation varie naturellement avec la nature du sous-sol, qui peut être perméable ou imperméable, avec l'inclinaison des coteaux qui peuvent retenir plus ou moins longtemps les eaux sur leurs versants, enfin et surtout, avec la nature de la végétation qui recouvre le sol. Il est donc impossible de calculer la perte qui lui incombe, il serait plus difficile encore de faire directement celle de la végétation. Il résulte toutefois d'expériences faites sur le canal de Bourgogne, que l'évaporation d'une nappe d'eau est en moyenne égale à la hauteur de la pluie tombée; cela prouve que l'évaporation

doit avoir la plus grande part dans le total lorsque le sous-sol est imperméable et les pentes peu rapides.

Le bassin qui nous occupe se compose d'environ deux tiers de terrains imperméables (granit, grès vosgiens, *Keuper*, *lias*), et d'un tiers de terrains perméables (terrains jurassiques). Les terrains non perméables ont leurs coteaux à pentes assez rapides, les terrains jurassiques sont vallonnés moins brusquement. La rivière se trouve donc dans d'assez bonnes conditions pour recevoir les eaux du bassin, et cependant elle n'en débite que les 38 centièmes.

Nous avons représenté les résultats des tableaux qui précèdent par des courbes (*fig.* 7) qui les rendent plus saisissants. — En résumé nous voyons :

1° *Que la végétation et l'évaporation absorbent en moyenne les* 62 *centièmes de l'eau tombée sur le bassin.*

2° *Que le rapport entre le volume de l'eau débitée et celui de l'eau tombée sur le bassin augmente ou diminue en même temps que ce dernier volume.*

3° De la variation de hauteur d'une même crue se propageant dans une section de rivière ne recevant pas d'affluents importants.

On organise aujourd'hui pour toutes les rivières sujettes à des inondations désastreuses, des services chargés d'annoncer aux populations l'arrivée et la hauteur des crues. La prédiction des inondations n'arrêtera pas le fléau, mais permettra d'éviter des désastres semblables à ceux qui se sont produits sur la Loire et la Garonne dans ces dernières années. Lorsqu'en effet les populations sauront d'une manière certaine quelques jours à l'avance, que leurs maisons seront envahies par les eaux, elles pourront fuir avec leurs mobiliers et sauver ainsi leurs personnes et leurs biens si malheureusement sacrifiés jusqu'ici.

Pour arriver à ce résultat, il faut que l'ingénieur chargé du service des inondations soit prévenu qu'une crue se

manifeste dans les parties supérieures de la rivière et dans les affluents importants, ce que les télégraphes installés actuellement le long des grands cours d'eau permettront de faire aisément, et ensuite qu'il sache calculer l'importance qu'aura cette crue dans les parties en aval. C'est cette deuxième question que nous avons étudiée. Tout d'abord nous l'avons simplifiée, en ne considérant la Saône que dans la traversée de la Côte-d'Or, où sur une longueur d'environ 84 kilomètres, elle ne reçoit aucun affluent important. Il est évident en effet, que le rapport entre la montée d'une même crue en un point donné, et la montée en un point situé à l'amont ne peut varier d'une manière régulière et mathématique, que dans ce cas ou dans celui où l'affluent aurait un régime identique au régime de la rivière principale. Autrement les crues indépendantes des affluents feraient varier brusquement la courbe représentant le rapport cherché, et il serait fort difficile *à priori*, de démêler la part d'influence de chacun des cours d'eau secondaires sur le régime du cours d'eau principal. Cette analyse sera au contraire facile une fois que l'on connaîtra la marche régulière d'une crue isolée; c'est le problème que nous nous sommes posé.

Il existe dans la Côte-d'Or des échelles hydrométriques, régulièrement observées aux écluses d'embouchures des six dérivations navigables, qui sont celles d'Heuilley, de Poncey, d'Auxonne, de Saint-Jean-de-Losne, du Châtelet et de Seurre. Ces échelles sont situées en moyenne à 2 kilomètres en aval des barrages qui alimentent les dérivations correspondantes, et à plus de 12 kilomètres en amont des barrages immédiatement inférieurs. En temps de crue les trois barrages inférieurs qui sont mobiles, sont couchés et les pertuis des trois barrages fixes supérieurs sont ouverts. Ils ne peuvent ainsi exercer aucune influence sur les échelles observées. En effet, la chute en hautes eaux même des barrages fixes, est très-faible et peut diminuer

jusqu'à s'effacer à peu près complétement, tandis que la pente de la rivière va en augmentant pour atteindre la pente générale de la vallée. Il en résulte que le remous des barrages en temps de crue s'étend à peine à quelques centaines de mètres, et ne peut atteindre les échelles. Nous trouverons donc, en utilisant leurs indications, le régime de la rivière libre, ce qui au point de vue de la valeur théorique des résultats obtenus a évidemment une grande importance.

Nous avons donc cherché à trouver la loi de variation des rapports entre les montées d'une même crue aux différentes échelles énumérées plus haut, de telle sorte qu'il suffira de multiplier la cote d'une crue donnée à l'aide des échelles par le coefficient ainsi trouvé pour avoir la cote de la même crue à l'écluse placée immédiatement à l'aval. De cette manière, quand on connaîtra la hauteur d'une crue à Heuilley, on calculera facilement sa hauteur à Poncey, puis partant de celle ci on trouvera celle d'Auxonne et ainsi de suite jusqu'à Seurre. Comme les crues mettent environ 36 heures pour se propager entre les points extrêmes, les avertissements pourront encore arriver en temps utile. Ce résultat pourra d'ailleurs s'étendre par la suite en faisant un travail analogue à l'amont et à l'aval de la Côte-d'Or ; mais nous devons dire que dans ce cas la question se compliquera par l'addition des crues d'affluents importants. Néanmoins on peut prévoir que dans un avenir peu éloigné ce résultat pourra être atteint, et les crues seront alors annoncées avec précision plusieurs jours à l'avance de Port-sur-Saône à Lyon.

Voici comment nous avons opéré pour trouver les rapports cherchés : Nous avons choisi dix crues par an, dans une période de 15 années, de 1861 à 1875 inclusivement, ce qui fait en totalité 150 crues étudiées. Puis pour obtenir par exemple le coefficient par lequel il faut multiplier la cote de la hauteur maximum d'une crue d'Heuilley pour avoir la hauteur maximum qu'atteindra la même crue à

Poncey, nous avons enregistré dans une première colonne les cotes des maxima des 150 crues considérées à Heuilley et en regard des cotes correspondantes du maximum à Poncey ; une simple division donne alors les rapports cherchés. Nous avons obtenu ainsi 150 coefficients dont quelques-uns se rapportaient à une même hauteur de crues à Heuilley. Théoriquement ces derniers auraient dû être identiques, mais il est évident que pratiquement il ne saurait en être ainsi, soit parce que ces circonstances locales sont variables dans certaines limites, d'une crue à l'autre, soit surtout parce que les observations se faisant à heures fixes, on a pu laisser échapper la vraie cote des maxima, soit à l'amont, soit à l'aval, malgré la durée de l'étale. Quoi qu'il en soit, les différences trouvées entre les coefficients se rapportant à une même hauteur de crue ont toujours été très-faibles.

Après avoir calculé les rapports ci-dessus, nous en avons dressé le tableau suivant, dans lequel les cinq dernières colonnes donnent les rapports cherchés pour les hauteurs de crues inscrites dans la première colonne. On observera toutefois qu'il y a là en réalité cinq tableaux condensés, et que par suite les chiffres de la première colonne ne représentent pas exclusivement la hauteur d'une crue à Heuilley, mais bien les hauteurs aux cinq premières échelles suivant les colonnes des coefficients considérées. Ainsi par exemple, pour savoir par quel chiffre il faut multiplier une crue de $1^m,71$ à Auxonne, pour avoir la hauteur de la même crue à Saint-Jean-de-Losne, on cherchera $1^m,71$ dans la première colonne et on trouvera en regard 1,340 dans la quatrième. De même pour avoir le coefficient, par lequel il peut multiplier une crue de $1^m,66$ à Heuilley, pour avoir la cote qu'atteindra la même crue à Poncey, on cherchera de même $1^m,66$ dans la première colonne et on trouvera 0,990 dans la deuxième. Ces deux exemples suffiront certainement pour éviter toute confusion.

TABLEAU DES COEFFICIENTS
des crues de la Saône dans la Côte-d'Or.

COTES du maximum de la crue à l'échelle d'amont.	COEFFICIENTS DES MONTÉES MAXIMA				
	de Poncey par rapport à Heuilley.	d'Auxonne par rapport à Poncey.	de Saint-Jean-de-Losne par rapport à Auxonne.	du Châtelet par rapport à Saint-Jean-de-Losne.	de Seurre par rapport au Châtelet.
mètres.					
0,34	»	»	»	»	2,820
0.40	»	»	1,800	»	»
0,43	»	»	»	»	2,520
0,54	»	»	1,985	»	2,290
0,59	»	»	»	»	2,475
0,60	»	»	1,950	»	»
0,61	»	»	»	»	2,035
0,65	»	»	»	»	1,720
0,67	»	»	»	»	2,000
0,70	»	»	»	»	2,030
0,72	1,560	»	»	— 0,850	»
0,74	»	»	»	»	1,865
0,78	1,510	»	»	»	»
0,80	»	»	»	»	1,590
0,81	»	»	»	»	1,660
0,82	1,185	»	1,880	»	»
0,83	»	»	»	»	1,780
0,84	»	»	»	»	1,730
0,85	»	»	»	»	1,680
0,86	»	«	1,710	»	»
0,90	»	»	1,580	»	»
0,91	»	»	»	»	1,705
0,93	»	»	»	»	1,630
0,95	»	»	»	»	1,710
0,97	»	0,410	»	»	»
0,98	»	»	1,540	»	»
1,00	»	»	1,510	»	1,575
1,01	»	»	»	»	1,760
1,02	»	»	1,570	»	1,505
1,03	»	»	»	»	1,670
1,04	»	»	1,615	»	»
1,06	»	»	1,450	»	1,620
1,07	»	»	»	0,320	»
1,08	»	»	1,470	»	»
1,10	»	»	»	»	1,600
1,11	»	»	1,640	»	1,515
1,12	»	0,480	1,550	»	»
1,13	»	»	»	»	1,380
1,14	»	»	1,545	»	»
1,15	»	»	»	»	1,520
1,16	»	»	1,510	»	»
1.17	»	»	1,455	0,390	»
1,18	»	0,510	1,570	»	»
1,19	»	»	1,480	»	»
1,20	»	»	1,470	»	1,510
1,21	»	»	1,620	»	»
1,22	»	»	»	»	1,680
1,24	»	»	»	»	1,460
1,25	»	»	1,465	»	1,430
1,26	»	»	1,455	»	»
1,27	1,160	»	»	»	»
1,28	»	»	»	»	1,410

TABLEAU DES COEFFICIENTS (suite).

COTES du maximum de la crue à l'échelle d'amont.	COEFFICIENTS DES MONTÉES MAXIMA				
	de Poncey par rapport à Heuilley.	d'Auxonne par rapport à Poncey.	de Saint-Jean-de-Losne par rapport à Auxonne.	du Châtelet par rapport à Saint-Jean-de-Losne.	de Seurre par rapport au Châtelet.
mètres.					
1,29	1,120	»	1,535	»	1,380
1,30	»	»	1,500	»	1,425
1,32	»	»	1,450	»	2,080
1,34	»	»	1,465	»	1,435
1,35	»	»	1,410	»	1,420
1,36	»	»	»	»	1,480
1,37	»	»	1,445	»	1,545
1 38	»	»	»	0 585	»
1,39	»	»	1,390	0,430	»
1,40	1,140	»	»	0,385	»
1,41	»	»	1,455	»	»
1,42	1,120	»	»	»	»
1,43	»	»	1,430	»	»
1,44	»	0,595	»	»	1,405
1,45	1,080	»	1,420	»	»
1,46	»	»	1,490	0,405	»
1,47	»	0,560	»	0,430	»
1,48	1,080	»	»	»	»
1,49	»	»	»	»	1,530
1,50	»	»	1,355	»	»
1,51	»	»	1,300	0,530	»
1,52	»	»	1,375	»	1,630
1,53	1,005	»	»	»	1 405
1,54	1,030	0,635	1,370	0,445	»
1,55	»	»	1,320	»	»
1,56	»	0,575	1,360	»	»
1,57	1,030	»	»	»	»
1,58	1,040	0,570	1,320	»	1,350
1,59	»	0,600	»	0,510	»
1,60	1,050	0,700	1,310	0,460	»
1,61	»	»	»	0,515	1 410
1,62	»	0,645	»	»	1,415
1,63	»	0,680	1,340	»	»
1,64	1,040	0,685	»	»	1,330
1,65	»	»	»	»	1,440
1,66	0,990	0,715	1,430	»	»
1,67	»	»	»	0,510	1,310
1,68	»	0,870	1,320	0,605	»
1,69	1,030	»	1,255	»	1,340
1,70	1,020	»	1,380	0,550	»
1,71	»	0.700	1,340	»	1,470
1,72	1,060	0,665	»	»	»
1,73	1,030	»	»	0,535	»
1,74	»	0.670	»	»	»
1,75	»	0.740	1,300	0,555	1,330
1,76	1,015	0,690	1,360	0,540	1,400
1,77	»	0,665	»	»	»
1,78	«	0,670	1,275	»	»
1,79	»	0,705	1,285	0,575	1,815
1,80	1,050	»	»	0,530	»
1,81	0,980	0,715	»	»	1,510
1,82	1,000	0,710	»	0,550	»
1,83	»	0,740	»	0,550	»
1,84	»	»	»	0,570	»

TABLEAU DES COEFFICIENTS (suite).

COTES du maximum de la crue à l'échelle d'amont.	COEFFICIENTS DES MONTÉES MAXIMA				
	de Poncey par rapport à Heuilley.	d'Auxonne par rapport à Poncey.	de Saint-Jean-de-Losne par rapport à Auxonne.	du Châtelet par rapport à Saint-Jean-de-Losne.	de Seurre par rapport au Châtelet.
mètres.					
1,85	»	»	1,180	0,610	1,360
1,86	0,985	0,760	»	»	1,385
1,87	1,025	0,720	»	0,565	1,315
1,88	»	0,700	1,260	»	»
1,89	0,935	»	1,280	»	»
1,90	0,980	0,760	1,205	»	»
1,91	»	»	»	0,580	1,235
1,92	0,975	0,710	»	»	1,330
1,93	»	»	»	0,585	1,370
1,94	»	0,745	»	»	»
1,95	»	»	1,245	»	1,320
1,96	0,985	0,765	1,270	0,640	1,350
1,97	0,965	0,530	»	»	1,320
1,98	»	0.760	1,270	0,615	1,455
1,99	»	0,805	»	»	»
2,00	0,970	0,770	1,210	0,650	»
2,01	»	»	1,300	»	»
2,02	0,950	0,770	1,260	0,615	»
2,03	»	»	1,275	»	»
2,04	»	»	»	0,625	»
2,05	0,935	»	1,320	0,645	»
2,06	0,950	0,815	1,260	0,630	»
2,07	»	0,805	»	0,650	1,380
2,08	0,960	0,760	1,240	0,640	»
2,09	0,955	0,840	»	0,655	1,380
2,10	0,950	»	1,180	»	»
2,11	»	»	»	0,645	1,320
2,12	»	0,815	»	0,680	»
2,13	0,930	0,805	»	»	»
2,14	»	0,805	»	»	»
2,15	0,940	0,820	»	»	1,335
2,18	0,945	»	»	0,770	»
2,19	»	»	1,260	»	1,290
2,20	0,940	»	1,235	»	1 490
2,21	0,860	»	»	»	»
2,22	0,930	0.850	»	0,685	1,325
2,23	0,930	0,885	»	0,685	»
2,24	»	0,815	»	»	»
2,26	0,895	0,870	1,220	»	»
2,27	»	0,925	»	0,750	»
2,28	0,935	0,865	1,240	0,710	»
2,29	»	0,860	1,180	0,765	»
2,30	»	0,880	»	0,705	»
2,31	»	0,875	»	»	»
2,32	»	0,890	»	»	»
2,33	0,920	»	»	0,705	1,240
2,34	0,905	»	1,210	»	»
2,35	0,900	»	»	0,710	»
2,36	0,905	0,865	»	»	1,255
2,37	0,830	0,930	»	0,715	1,295
2,38	»	0,875	1,240	0,695	»
2,39	»	»	»	0,740	1,250
2,42	»	0,890	»	0,730	»
2,43	0 875	0,940	»	0,730	1,330

TABLEAU DES COEFFICIENTS (suite).

COTES du maximum de la crue à l'échelle d'amont.	COEFFICIENTS DES MONTÉES MAXIMA				
	de Poncey par rapport à Heuilley.	d'Auxonne par rapport à Poncey.	de Saint-Jean-de-Losne par rapport à Auxonne.	du Châtelet par rapport à Saint-Jean-de-Losne.	de Seurre par rapport au Châtelet.
mètres.					
2,44	0,915	0,900	»	»	»
2,45	0,920	»	»	»	1,340
2,46	0,910	»	»	»	»
2,47	0,915	0,915	»	»	1,295
2,48	»	0,960	»	»	»
2,49	0,860	»	»	»	»
2,50	0,905	»	»	»	»
2,51	»	»	»	0,735	1,320
2,52	0,905	»	»	»	»
2.53	0,910	»	1,200	»	»
2,54	»	»	1,180	»	»
2,55	0 895	0,910	»	0,730	1,310
2,56	0,900	»	1,200	»	»
2,57	0,890	»	»	0,770	»
2,58	»	»	1,200	0,750	»
2,59	0,885	»	»	0,750	1,295
2,60	0,880	1,000	1,160	0,740	»
2,61	»	0,990	1,145	0,745	»
2,62	»	»	1,205	»	»
2,63	0.900	»	»	»	»
2,64	0,895	»	»	0,745	»
2,65	»	»	1,160	»	»
2,66	0,870	»	»	»	»
2,67	0,905	0,965	»	»	1,340
2,69	»	»	1,170	»	1,400
2,70	0,900	»	»	»	1,330
2,71	0,895	0,975	»	0,770	»
2,72	»	0,955	»	»	»
2,73	»	0,985	1,150	»	»
2,75	»	»	»	0,765	»
2,76	»	0,950	1,190	0,800	1,340
2,77	»	»	1,180	»	1,320
2,78	»	1,000	»	»	1,310
2,79	0,890	0,990	1,220	0,770	»
2,80	»	»	»	»	1,300
2,81	»	1,020	»	»	1,320
2,82	0,865	0,975	»	0,785	1,290
2,83	»	»	1,145	»	»
2,84	»	»	»	0,770	1,250
2,85	0,865	»	»	»	1,300
2,86	»	»	1,175	»	1,320
2,87	»	1,010	1,165	»	»
2,89	»	0,995	»	»	»
2,90	»	»	1,140	»	»
2,91	»	»	1,150	»	1,290
2,92	0,875	0,970	»	»	»
2,93	»	1,000	»	»	»
2,94	»	»	1,140	»	1,320
2,95	»	1,010	»	»	1,290
2,96	»	1,000	1,170	0,795	»
2,97	0,860	1,000	1,170	»	1,315
2,98	0,870	»	1,140	»	»
2,99	0,905	0,985	»	0,790	1,270
3,00	»	»	»	»	1,320

TABLEAU DES COEFFICIENTS (suite).

COTES du maximum de la crue à l'échelle d'amont.	COEFFICIENTS DES MONTÉES MAXIMA				
	de Poncey par rapport à Heuilley.	d'Auxonne par rapport à Poncey.	de Saint-Jean-de-Losne par rapport à Auxonne.	du Châtelet par rapport à Saint-Jean-de-Losne.	de Seurre par rapport au Châtelet.
mètres.					
3,01	»	»	»	0,810	1,330
3,02	»	0,975	»	»	1,310
3,03	0,860	»	1,140	»	1,270
3.04	0,855	»	»	0,805	1,280
3,05	»	»	»	»	1,300
3,07	»	0,985	»	0,805	»
3,08	0,865	»	1,090	0,795	»
3,10	»	1,000	1,110	0,825	1,295
3,11	»	»	1,105	»	»
3,13	»	»	»	»	1,320
3,15	»	»	»	0,805	1,390
3,16	0,865	0,975	»	»	»
3,17	»	»	1,100	»	1,280
3,18	»	1,005	»	»	»
3,19	»	»	»	»	1,300
3,20	0,850	1,010	»	»	1,315
3,21	0,860	»	»	»	»
3,22	0,865	1,015	1,070	0,810	1,350
3,24	»	1,000	1,085	0,830	»
3,25	0,855	»	»	»	»
3,26	0,820	1,000	1,100	»	»
3,27	»	»	1,065	»	»
3,28	»	1,015	»	0,825	»
3,29	»	1,030	»	»	1,270
3,31	»	0,980	»	0,805	»
3,32	0,860	»	»	»	»
3,33	»	»	1,055	0,805	»
3,34	»	1,020	»	0,845	»
3,35	»	»	»	0,830	»
3,36	0,870	»	»	0,810	»
3,37	»	»	»	0,835	1,370
3,38	0,870	»	»	0,845	1,310
3,39	»	»	1,040	»	»
3 40	»	»	»	0,840	»
3,41	»	»	1,040	»	»
3,42	0,870	»	»	0,830	»
3,43	»	»	»	»	1,490
3,44	»	»	»	0,850	»
3,45	»	»	»	0,880	1,350
3,46	0,865	1,025	»	0,860	»
3,47	»	1,040	»	0,870	»
3,48	0,860	1,025	»	0,855	»
3,49	»	»	»	0,860	»
3,50	»	1,020	»	0,855	»
3,51	0,870	1,025	»	0,865	»
3,52	»	»	»	0,865	»
3,53	0,855	»	»	»	»
3,54	0,830	1,030	»	»	1,320
3,55	0,875	1,030	1,020	0,860	»
3,57	0,880	»	1,015	0,855	1,005
3,58	0,845	1,030	»	0,855	»
3,59	»	»	1,040	»	»
3,60	0,880	1,040	0,995	»	»
3,61	»	»	»	0,875	»

TABLEAU DES COEFFICIENTS (suite).

COTES du maximum de la crue à l'échelle d'amont.	COEFFICIENTS DES MONTÉES MAXIMA				
	de Poncey par rapport à Heuilley.	d'Auxonne par rapport à Poncey.	de Saint-Jean-de-Losne par rapport à Auxonne.	du Châtelet par rapport à Saint-Jean-de-Losne.	de Seurre par rapport au Châtelet.
mètres.					
3.63	0,880	»	»	»	»
3,64	0,890	»	»	»	»
3,65	0,900	»	1,000	0,875	»
3,66	»	1,045	1,005	0,880	»
3,67	»	»	»	0,870	»
3,68	0,875	»	»	0,860	»
3,69	0,870	»	»	»	»
3,70	»	»	1,010	»	»
3,71	»	1,050	»	»	»
3,73	0.875	»	»	»	»
3,74	»	»	»	0,900	»
3,75	0,870	»	1,000	0,875	1,410
3,83	»	»	1,000	»	»
3,84	0,905	»	»	0,880	»
3,85	0,910	»	»	0,890	»
3,86	0,895	»	»	»	»
3,88	0,895	»	0,990	»	»
3,89	0,910	»	»	»	»
3,90	0,910	1,050	»	»	»
3,91	»	1,050	»	»	»
3.92	»	»	»	0,880	»
3,96	0,910	»	»	»	»
3,98	0,890	»	»	0,890	»
3,99	»	1,050	»	»	»
4,02	»	»	»	0,935	»
4.05	0,880	»	»	»	»
4,06	0,905	»	»	»	»
4,10	»	»	0,960	»	»
4,14	0,870	»	»	»	»
4,19	»	»	0,960	»	»
4,42	0,885	»	»	»	»
4,46	0.895	»	»	»	»
4,47	0,875	»	»	»	»

Si nous cherchons à représenter graphiquement les résultats qui précèdent, en prenant pour abscisses les hauteurs des maxima d'amont et pour ordonnées les coefficients des montées maxima à l'échelle considérée, nous remarquerons que les points ainsi obtenus se groupent nettement autour d'une courbe régulière qui n'est autre qu'une parabole du second degré. Les équations de ces couches sont respectivement :

1° *Heuilley — Poncey.*

$$y = 0{,}865 + \frac{(3{,}20 - x)^2}{14}.$$

2° *Poncey — Auxonne.*

$$y = 1{,}05 - \frac{(3{,}75 - x)^2}{11},$$

3° *Auxonne — Saint-Jean-de-Losne*

$$y = 1{,}00 + \frac{(3{,}60 - x)^2}{11},$$

4° *Saint-Jean-de-Losne — le Châtelet.*

$$y = 0{,}87 - \frac{(3{,}75 - x)^2}{12},$$

5° *Le Châtelet — Seurre.*

$$y = 1{,}28 + \frac{(2{,}70 - x)^2}{10}.$$

Dans ces équations, y représente le coefficient cherché, et x la cote de la crue à l'échelle d'amont. On remarquera que le signe du second terme change de sens d'une courbe à l'autre, de telle sorte que si une courbe a sa convexité tournée vers le haut, celle qui la suit immédiatement aura, au contraire, sa convexité tournée vers le bas, et réciproquement. De sorte que le coefficient passe alternativement par un maximum ou un minimum pour les grandes hauteurs des crues. Ce fait curieux n'a évidemment rien qui doive surprendre. Il en résulte que la crue, alternativement élevée et abaissée dans son parcours, se propage comme une onde et se maintient ainsi entre les mêmes limites. Si toutes les courbes avaient, au contraire, leur convexité tournée dans le même sens, celui du maximum par exemple, et si ces maxima étaient tous plus grands que 1, la crue irait en augmentant constamment de hauteur, ce

qui serait absurde. L'inverse aurait lieu, c'est-à-dire que la crue finirait par s'annuler, dans le cas de minima plus petits que 1. On pourrait cependant concevoir toutes les courbes tournées dans le même sens et la crue se propageant par ondes; il faudrait pour cela que les courbes aient alternativement leurs ordonnées maxima plus grandes et plus petites que l'unité. Mais, dans ce cas, le mouvement d'ondulation serait le même, quelle que fût la hauteur de la crue; tandis qu'avec les courbes à convexités renversées que nous avons obtenues, il en résulte que la propagation des grandes crues est inverse de celles des petites crues.

Si nous appelons K le coefficient, H la hauteur de la crue à l'amont, et H′ la hauteur de la crue au point considéré, nous aurons :

$$H' = KH,$$

et comme on a :

$$K = \alpha H^2 + \beta H + \gamma,$$

on en tire :

$$H' = \alpha H^3 + \beta H^2 + \gamma H.$$

La hauteur H′ est donc une fonction parabolique du 3e degré de la hauteur H. Il est nécessaire de remarquer que H′—H ne représente pas la pente instantanée de la rivière entre les deux points considérés, car les deux cotes H et H′ sont séparées par un intervalle de temps qui est celui de la propagation de la crue, déduction faite de la durée de l'étale. Il en résulte une oscillation dans la pente. Quand l'eau atteint le niveau H à l'amont, elle est au-dessous de H′ à l'aval : la pente a une certaine valeur. Pendant l'étale, l'eau reste au niveau, H à l'amont; tandis qu'elle monte à l'aval, la pente diminue. Après la fin de l'étale, l'eau baisse en amont et continue à monter à l'aval jusqu'en H′ : la pente diminue encore. Pendant l'étale d'aval, l'eau baisse toujours en amont, et la pente va encore en

diminuant. Enfin l'eau baisse à la fois à l'amont et à l'aval, mais d'abord plus lentement à l'aval qu'à l'amont : c'est donc après l'étale d'aval, et alors que l'eau a déjà baissé d'une certaine quantité, que se trouve le minimum de pente instantanée. On trouverait, par une analyse analogue, que le maximum de pente instantanée se trouve un peu avant que l'eau n'ait atteint son maximum à l'échelle d'amont.

Comme on ne remarque pas d'oscillations dans la vitesse de propagation d'une crue, il est évident que la considération de la pente instantanée serait sans valeur pour le calcul de cette vitesse. La propagation d'une crue est un phénomène d'ordre ondulatoire, et doit fort probablement en suivre les lois, modifiées toutefois par le transport de l'eau et le remplissage du lit majeur. On sait, depuis les expériences de M. Bazin, ingénieur en chef du canal de Bourgogne (voir le mémoire dans le Recueil des savants étrangers à l'Institut, ainsi que le rapport fort élogieux de Clapeyron), qu'une onde se propage avec une vitesse donnée par la formule :

$$V = \sqrt{g(H \pm h)} \pm w,$$

dans laquelle V est la vitesse de propagation de l'onde, H la profondeur de l'eau dans le canal, h la hauteur de l'onde à prendre positivement ou négativement, suivant qu'elle forme une intumescence ou un creux, et enfin w la vitesse de l'eau dans le canal à ajouter ou à retrancher, suivant que l'onde marche dans le même sens ou en sens contraire de l'eau.

Quelle modification faut-il apporter à cette formule pour obtenir la vitesse de propagation d'une crue? En un mot, comment évaluer le retard causé par le remplissage du lit majeur? Voilà ce que malheureusement les données que nous avons compulsées ne nous ont pas permis de faire.

Les observations hydrométriques que nous avions entre les mains étaient faites à heures fixes, et par suite il nous a été impossible d'avoir l'heure exacte du maximum. Dans les quelques cas où les agents ont inscrit ces heures en marge, quelle confiance peut-on y ajouter? Ont-ils pris le commencement, le milieu ou la fin de l'étale? Rien ne l'indique, et, comme les points sont très-rapprochés, il est impossible de tirer une loi de faits aussi grossièrement observés. Il serait bien à désirer que des expériences précises fussent faites, car il ne suffit pas de savoir trouver la hauteur qu'atteindra une crue, il faut, pour être complet, pouvoir prévenir les populations du moment précis de son arrivée.

Le tableau suivant, qui donne les hauteurs au-dessus du niveau de la mer (nivellement Boudaloue) et les distances des échelles, permettra de tracer les profils des maxima de la rivière à différentes hauteurs de crue :

Tableau des échelles.

NOMS des échelles.	HAUTEUR au-dessus de la mer.	DISTANCES partielles.
	mètres.	mètres.
Heuilley.	181.805	»
Poncey.	180.185	15.200
Auxonne.	178.881	9.700
Saint-Jean-de-Losne. . .	176.794	18.800
Le Châtelet.	175.950	12.400
Seurre.	173.716	14.400

Si maintenant nous considérons de plus près les courbes tracées sur les *fig.* (1), (2), (3), (4) et (5), nous remarquerons que quatre d'entre elles représentent très-exactement les phénomènes observés, mais que celle de Saint-Jean-de-Losne (Auxonne) présente une anomalie. Pour les crues moyennes, les points qui représentent les coefficients réels étant sensiblement au-dessus de la parabole. Cet écart est facile à expliquer. Le bief de Saint-Jean-de-Losne

est, en effet, le seul des biefs observés qui reçoive des affluents dont on puisse avoir à tenir compte, qui sont la Tille et l'Ouche. On conçoit que ces rivières, bien que d'un débit fort inférieur à celui de la Saône, puissent exercer une certaine influence. Dans les crues moyennes, les deux rivières ci-dessus peuvent être très-grossies par des orages et charrier une quantité d'eau suffisante pour surélever le niveau de la Saône d'une manière sensible; il en résulte que le coefficient calculé, indépendamment de cette considération, doit être trop faible, et c'est en effet ce que nous avons trouvé. Dans les grandes crues, au contraire, le débit de la Saône est tellement supérieur à celui de ses affluents que ceux-ci sont sans influence appréciable sur la hauteur de la crue, et par suite le coefficient ne saurait en être affecté. Il en est de même pour les petites crues, où la Tille et l'Ouche ont un débit insignifiant.

Cette petite anomalie indique donc comment les affluents viennent déformer les courbes; malheureusement il s'agissait là d'un phénomène trop peu important pour qu'il soit permis d'en tirer des conséquences utiles au point de vue de la loi de variation du coefficient.

En résumé, nous voyons que, lorsque la rivière ne reçoit aucun affluent important, la crue se propage de telle sorte que : 1° *le coefficient par lequel il faut multiplier la hauteur du maximum en un point donné, pour avoir la cote du maximum en un point situé à* 10 *ou* 15 *kilomètres à l'aval, est une fonction parabolique du second degré de la première cote;* 2° *si l'on calcule ainsi les courbes représentatives des coefficients, en allant de l'amont à l'aval, elles présenteront alternativement un maximum ou un minimum correspondant aux grandes crues.*

Dijon, le 20 août 1878.

N° 55

NOTE

SUR

UN PROCÉDÉ EMPLOYÉ A HONFLEUR

POUR FACILITER

LE BATTAGE DES PIEUX ET DES PALPLANCHES

Par M. WIDMER (Edouard), ingénieur des ponts et chaussées.

Nous croyons intéressant de porter à la connaissance des lecteurs des *Annales* un procédé que nous avons employé à Honfleur en 1874-1875, et que nous appliquons de nouveau en ce moment avec succès pour faciliter le battage des pieux et des palplanches.

Le terrain dans lequel le battage doit être opéré est, comme tous les bancs de la baie de Seine, formé de vases et de sables fins déposés en une série de couches horizontales alternatives qui donnent aux talus des fouilles qu'on y pratique une apparence feuilletée.

La proportion de vase et de sable est variable; le tableau suivant résume les résultats de l'analyse de divers échantillons recueillis dans le voisinage des deux ouvrages dans la construction desquels nous avons employé le procédé dont la description fait l'objet de la présente note.

	NUMÉROS.	EAU.	VASE.	SABLE.
Echantillons recueillis le long de l'estacade construite en 1874-1875 dans le prolongement de la jetée de l'Ouest.	1 2 3	0,243 0,262 0,336	0,362 0,258 0,258	0,395 0,480 0,406
Échantillons recueillis sur l'emplacement de l'écluse de chasse actuellement en construction. . .	1 2 3	0,208 0,241 0,282	0,055 0,125 0,176	0,737 0,634 0,542

Le battage des pieux dans ce terrain a, de tout temps, présenté de grandes difficultés; aussi, lors de la rédaction du projet de prolongement de la jetée de l'Ouest, avait-on eu l'idée de constituer les pilots de $10^m,50$ de longueur destinés à supporter les fermes de l'estacade au moyen de tubes en tôle de $0^m,38$ de diamètre. Les tubes, une fois enfoncés, devaient être vidés, puis remplis de béton sur la moitié de leur hauteur; la colonne de béton ainsi formée servait enfin de base à un pieu en hêtre sur lequel était pratiqué l'assemblage avec la ferme.

C'est pour le curage de ces tubes, dont une vingtaine avaient été, non sans peine d'ailleurs, enfoncés à la sonnette, que nous eûmes pour la première fois recours au procédé suivant :

L'extrémité de la conduite de refoulement d'une petite pompe centrifuge, du système Neut et Dumont (*), était engagée dans le tube à curer. Pour donner plus de force à l'eau, l'extrémité de cette conduite, qui était formée de tuyaux en caoutchouc, était armée d'une lance en cuivre analogue à celles des pompes à incendie. Sous l'action du jet de la pompe, la vase et le sable étaient mis en suspension et entraînés par l'eau qui ressortait à la partie supérieure du tube. On réussit de la sorte, en descendant peu à peu le tuyau en caoutchouc, à vider plusieurs tubes jusqu'à 10 mètres de profondeur.

Un peu plus tard (décision ministérielle du 7 novembre 1874), les tubes furent abandonnés : on les remplaça par de simples pieux de $10^m,50$ de longueur, dont l'enfoncement avait été, entre temps, reconnu plus facile et plus économique.

Malgré une installation mécanique qui permettait de frapper quatre à cinq coups à la minute avec des volées

(*) La pompe employée est du type n° 2 *bis*. Elle fait 1.800 tours à la minute.

de $2^m,50$ à 3 mètres, l'enfoncement moyen de ces grands pieux n'était guère cependant que de 1 mètre par heure.

Nous eûmes l'idée alors de pratiquer, à l'aide du jet de la pompe centrifuge qui nous avait servi pour le curage des tubes, un *avant-trou* sur l'emplacement du pieu à battre.

Le tuyau de caoutchouc, armé de la lance, était présenté normalement au sol, dans lequel il s'enfonçait aisémen jusqu'à 6 ou 7 mètres de profondeur.

Au bout d'une dizaine de minutes on le retirait lestement; on descendait le pieu, que l'on avait eu soin de tenir tout paré, suspendu à la sonnette au moyen de palans. Sous l'action de son propre poids, augmenté de celui du mouton qu'on amenait sur sa tête, le pieu pénétrait dans le sol de 4 à 5 mètres. Si l'on avait soin de commencer immédiatement le battage, le terrain, ameubli sur une certaine épaisseur par le jet de la pompe, livrait facilement passage au pieu. Dans ces conditions, la durée de l'enfoncement total du pilot put être réduite de moitié. Les fondations de la jetée, qui s'exécutaient en régie, furent continuées de la sorte et menées à bonne fin le 16 mars 1875. Aucun mouvement ne s'est manifesté dans l'ouvrage.

Dans le courant du mois d'octobre dernier, l'entrepreneur des travaux de l'écluse de chasse d'Honfleur commença le battage d'une ligne de palplanches de $5^m,50$ de longueur, destinée à former l'enceinte de l'avant-radier de l'ouvrage. La durée moyenne du battage effectif d'une palplanche était de 42 minutes; en outre, sur les 16 premières palplanches battues, 6 se fendirent sous le choc du mouton et durent être récépées; enfin, pour les premiers panneaux, dont la largeur était de $1^m,70$, la somme des vides laissés entre les palplanches atteignait en moyenne 8 à 10 centimètres.

En présence de ce résultat, nous engageâmes l'entrepreneur à recourir au procédé qui nous avait réussi pour les fondations de la jetée de l'Ouest.

L'enfoncement vertical des palplanches étant un point capital, nous prescrivîmes l'emploi d'une lance de 3 mètres de longueur. Cette lance a été exécutée en tôle galvanisée. Le croquis (voir Pl. 22, *fig.* 1, 2 et 3) montre la disposition fort simple à l'aide de laquelle on la manœuvre.

La sonnette une fois en place et la palplanche tenue en l'air à l'aide de palans, on place la lance verticalement au centre des jumelles. On met la pompe en marche, l'eau sort avec assez de force pour produire immédiatement un trou dans lequel on descend peu à peu la lance. Au bout de trois à quatre minutes elle se trouve enfoncée de toute sa longueur. On la retire alors vivement, et on laisse descendre la palplanche dans le trou ainsi préparé; sous le simple poids du mouton, la palplanche pénètre dans le sol en moyenne de $2^m,50$; les premiers coups, donnés avec des volées de $0^m,50$ à $0^m,80$, produisent encore un enfoncement de $1^m,50$. On porte alors la volée à 2 mètres, et l'on parvient de la sorte, lorsque l'opération est continuée sans interruption, à réduire à 20 minutes au maximum la durée totale de l'enfoncement. Depuis que ce procédé est employé, sur 72 palplanches battues, aucune ne s'est brisée. On a réussi, en outre, à obtenir des panneaux, de $1^m,70$, dans lesquels la somme des vides laissés entre les palplanches n'excède pas 2 à 3 centimètres.

Ce résultat, tout satisfaisant qu'il soit pour l'opération du battage en elle-même, laisserait à désirer si l'on devait avoir quelques inquiétudes sur la solidité des pieux et palplanches enfoncés par le procédé que nous venons d'indiquer.

Pour nous renseigner à cet égard, nous avons fait battre deux palplanches de $5^m,50$ à une petite distance l'une de l'autre dans les conditions suivantes :

L'une a été battue sans interruption aussitôt après sa descente dans le trou pratiqué à la lance; 17 coups ont suffi pour l'amener à sa position définitive; au dernier

coup, la chute d'un mouton de 570 kilog., tombant de 2 mètres de hauteur, produisait encore un enfoncement de $0^m,03$.

La seconde palplanche fut simplement mise en fiche dans l'avant-trou, puis abandonnée un soir, n'ayant reçu qu'un enfoncement total de $4^m,16$. On la reprit le lendemain matin après quatorze heures d'interruption. Pour terminer l'enfoncement, il fallut une volée de 51 coups de mouton, dont les derniers ne produisaient plus qu'un enfoncement de $0^m,01$.

Cette différence s'explique aisément par le fait que le sable contenu dans le terrain se condense autour de la palplanche lorsqu'il n'est plus tenu en suspension dans l'eau ; plus la proportion de sable est forte, plus l'enfoncement dans les conditions que nous venons d'indiquer devient difficile.

Honfleur, le 11 décembre 1877.

Quelques ingénieurs nous ayant exprimé la crainte que l'emploi du procédé ci-dessus décrit n'entraînât une diminution dans la résistance des pilots, par suite de la réduction du frottement latéral, nous avons procédé aux expériences suivantes.

Ces expériences ont été faites dans la fouille de fondation de l'écluse de chasse d'Honfleur, dans le terrain dont nous avons indiqué la composition au commencement de la note.

Quatre pieux, présentant chacun 7 mètres de longueur, ont été choisis de diamètres sensiblement égaux; deux d'entre eux ont été mis en fiche, sur 3 mètres de profondeur, suivant le procédé ordinaire; les deux autres ont reçu la même fiche à l'aide d'un avant-trou pratiqué à la lance et de quelques coups de mouton simplement destinés à les assurer dans cet avant-trou. Après cinq jours d'in-

tervalle, les quatre pieux ont été successivement repris et enfoncés à profondeur. On a noté exactement le nombre de coups de mouton nécessaires pour obtenir ce résultat, ainsi que l'enfoncement produit par chacun d'eux.

Il résulte des attachements tenus que l'on ne peut établir aucune différence appréciable entre les quatre pilots au point de vue de la résistance au battage.

C'est ce que démontre le tableau suivant :

DÉSIGNATION DES PIEUX.		DIAMÈTRE MOYEN.	NOMBRE de coups de mouton nécessaires pour produire après 5 jours de fiche 3m,75 d'enfoncement.	ENFONCEMENT PRODUIT le jour de la seconde opération	
				par les dix premiers coups de mouton.	par les dix derniers coups de mouton.
		mèt.		mèt.	mèt.
Pieu n° 1.	Mis en fiche sans le secours de la lance.	0,30	216	0,37	0,125
Pieu n° 2.		0,26	186	0,32	0,145
Pieu n° 3.	Mis en fiche avec le secours de la lance.	0,31	236	0,35	0,110
Pieu n° 4.		0,29	220	0,39	0,085

OBSERVATION.

La hauteur de chute du mouton a été maintenue uniformément à 4 mètres pendant toute la durée des expériences.

La charge qu'on peut avec sécurité faire supporter à un pieu étant, toutes choses égales d'ailleurs, fonction de l'enfoncement moyen produit par les derniers coups de mouton, on voit que, dans le terrain sur lequel nous avons opéré, l'emploi du procédé dont il s'agit ne diminue en aucune façon cette charge.

Honfleur, le 24 juillet 1878.

N° 56

NOTE SUR LE SIGNAL AVERTISSEUR

SYSTÈME MOREAUX (*)

PAR M. MOREAUX.

Détail des pièces. — L'appareil se compose (V. Pl. 22, *fig.* 4 et 5) : d'un bâti en fonte BB (*fig.* 12 et 13), d'une poulie à gorges O (*fig.* 8 et 9), destinée à recevoir les chaînes de manœuvre et fixée sur un bout d'arbre indépendant A'; d'un verrou V (*fig.* 10 et 11) articulé sur l'arbre A du signal, d'une pédale P et d'un levier L (*fig.* 15 et 16); la pédale soudée à l'extrémité d'un arbre KK', le levier emmanché à l'autre extrémité et en sens inverse.

Sur le bâti BB (*fig.* 12 et 13) sont venues de fonte différentes douilles destinées à recevoir : 1° la douille Q, le petit axe autour duquel oscille le levier de rappel de transmission M N (*fig.* 6 et 7); — 2° les deux petites douilles C et C', deux petits axes recouverts de caoutchouc destinés à amortir le choc et à limiter la course du levier L et partant de la

(*) Dans sa séance du 12 février 1878, la commission des inventions et règlements concernant les chemins de fer, après avoir entendu un rapport sur cet appareil présenté par M. Meissonnier, inspecteur général des mines, a émis l'avis suivant : « La commission, considérant que le disque de M. Moreaux paraît avoir « rendu, sur le réseau du Nord, des services appréciés par un certain nombre d'agents de l'exploitation, est d'avis qu'il y a lieu « de faire connaître cet appareil aux compagnies, sans toutefois « leur en recommander l'emploi. Elle exprime, en outre, le vœu « qu'une note descriptive soit insérée dans les *Annales des ponts* « *et chaussées* et dans les *Annales des mines.* »

pédale P; — 3° la douille U, l'extrémité de l'arbre KK' sur lequel sont fixés le levier et la pédale.

Sont également venues de fonte sur le bâti deux parties cylindriques *h* et *h'* destinées à limiter le quart de révolution du signal et servant de heurtoir à la poulie O.

Le collet G du bâti présente deux diamètres différents. L'un, plus petit, est égal au diamètre de l'arbre A' sur lequel est fixée la poulie à gorges O : l'autre, plus grand, égal au diamètre de l'arbre du signal, sur lequel arbre se trouve articulé le verrou V. Sur l'embase formée par la différence de ces diamètres repose la petite lentille I (*fig.* 14) destinée à bien séparer les deux arbres A et A', et à leur donner une indépendance complète vis-à-vis l'un de l'autre. De plus, ces deux arbres tournant tous deux sur pivot, il n'y a à craindre ni l'encrassement, ni la congélation de l'huile pendant l'hiver, ce qui se produirait si la poulie à gorges O tournait tout simplement autour de l'arbre A prolongé.

La poulie O (*fig.* 8 et 9) a deux gorges qui reçoivent, l'une, le fil qui vient de la gare, l'autre, la chaîne qui va au levier de rappel MN. Elle possède, à sa partie inférieure, une queue *q*, qui, avec les heurtoirs *h* et *h'*, sert à limiter son quart de révolution. Les heurtoirs *h* et *h'* sont armés de petits tampons en caoutchouc destinés à amortir le choc de la manœuvre. A l'extrémité du rayon du plateau supérieur de la poulie sont venus de fonte deux bourrelets *b* et *b'* laissant entre eux un espace vide ou encoche E. C'est au moyen de cette encoche et du verrou V que s'établit la relation entre le signal A et la manœuvre de la gare, de laquelle dépend la poulie O.

Le verrou oscille au moyen de deux petits axes vissés sur chacune de ses fourches, et dont les extrémités jouent librement dans deux trous percés sur le bloc carré qui se trouve calé sur l'arbre A.

La pédale P est une masse de fer arrondie et soudée à l'extrémité de l'arbre KK'. A l'autre extrémité de cet arbre

est emmanché le levier L qui est plus léger que la pédale. Dans la position naturelle, la pédale emporte le levier L. L'extrémité de l'arbre KK', du côté de la pédale, est supportée par un petit palier en fonte.

Sur l'arbre du signal A se trouve fixée la poulie R autour de laquelle s'enroule la chaîne qui, au moyen de la poulie à gorge S, aboutit au petit poids *p*. C'est le poids automoteur qui fait tourner le disque quand le déclanchement est opéré par le train.

Ces explications préliminaires données, voyons comment fonctionne l'appareil. Les *fig.* 4 et 5 représentent le signal à voie libre. Le verrou V repose dans l'encoche de la poulie à gorges O. La pédale P se trouve près du rail, dont elle atteint le champignon (à la partie inférieure), et elle est maintenue dans cette position par le levier L, sur lequel appuie de tout son poids le verrou V. —Le petit poids automoteur *p* ferait tourner le signal et le mettrait à l'arrêt, si le verrou V n'était retenu par l'arête du bourrelet *b* formant sur le plateau de la poulie O l'encoche E. — Quand le train passe, le boudin de la roue abaisse la pédale (trait —·—·—). Le levier L se relève (trait —·—·—) et chasse le verrou de l'encoche; le petit poids automoteur agit, et met le disque à l'arrêt. Le verrou V vient occuper la position figurée en V sur le bourrelet *b* de la poulie O.

La pédale, nous l'avons dit, est plus lourde que le levier L, elle reste donc abaissée; le levier qui limite la course de la pédale est arrêté par le petit axe *c'*.

Le disque est donc à l'arrêt, la sonnerie électrique l'indique à la gare. L'aiguilleur fait la manœuvre du levier comme si le disque n'était pas automatique. Le levier à lentille MN s'abat dans la position indiquée par le trait pointillé; la poulie O décrit un quart de tour dans le même sens que celui décrit tout à l'heure par le signal, et lorsque l'encoche se trouve en face du verrou V, celui-ci y retombe. Un mouvement inverse de la manœuvre ramène la poulie O

et le disque qui en dépend, puisque le verrou est enclanché, dans la position de voie libre. Dans ce mouvement, le verrou V a rencontré le levier L, l'a abaissé, et, partant, a relevé la pédale qui se trouve prête à recevoir le choc de la première roue du prochain train.

Le disque étant solidaire de la poulie O par l'intermédiaire du verrou V, la manœuvre est absolument la même pour le signal automatique que pour les autres.

Comme on le voit, tous ces mouvements sont très-simples, et il n'y a pas à craindre que telle ou telle pièce vienne à se briser et à empêcher le signal de fonctionner. Seul, le verrou est à articulation et pourrait quelquefois se briser. Mais, dans ce cas, il disparaît et le signal se met naturellement à l'arrêt, entraîné par le petit poids automoteur, sans qu'il soit possible de le remettre à voie libre. Quant à la pédale, sa disposition donne toute garantie : aussitôt qu'elle est touchée et que le verrou, sorti de l'encoche, repose sur le bourrelet *b* de la poulie O, elle reste abattue rien que par son propre poids, elle ne reçoit donc que le choc d'une roue ou deux. Dans les appareils à pédale qu'on a employés jusqu'ici (dans les pédales à soufflet notamment), la pédale recevait le choc de toutes les roues, elle ne pouvait résister bien longtemps, de là les préventions contre tous les systèmes à pédale. Dans ce nouveau système, rien n'est à craindre en ce qui concerne cet organe de l'appareil automatique. On peut, en effet, lui donner la force qu'on veut : puisqu'il suffit que le poids du verrou ramène l'équilibre en faveur du levier L, on peut donner au levier L et à la pédale P n'importe quels poids, pourvu que la différence entre ces poids reste toujours la même. De plus, la pédale ne reçoit qu'un choc ou deux, et ces chocs sont relativement légers, le sommet de la pédale se trouvant à $0^{m},023$ en contre-bas du rail.

CHRONIQUE.

Octobre 1879.

N° 57

NOTE
SUR
ALBUM DE STATISTIQUE GRAPHIQUE DE 1879

Publié par le Ministère des travaux publics
(Direction des cartes et plans).

Le ministère des travaux publics vient de publier un album de atistique graphique, sur lequel nous croyons utile d'appeler l'at- ntion des lecteurs des *Annales*.

Un arrêté, en date du 12 mars 1878, a institué à la direction des rtes et plans un service de statistique graphique, chargé « de préparer des cartes figuratives et des diagrammes exprimant, sous la forme graphique, les documents statistiques, relatifs, soit aux courants de circulation des voyageurs et marchandises sur les voies de communication de tous ordres et dans les ports de mer, soit à la construction et à l'exploitation de ces voies; en un mot à tous les faits économiques, techniques ou financiers, qui relèvent de la statistique et peuvent intéresser l'administration des travaux publics. »

Aux termes de ce même arrêté, ceux de ces travaux qui com- ortent la publicité doivent être imprimés et publiés, vers le 15 jan- er de chaque année, en un album « qui comprendra un certain noyau de planches de fondation se reproduisant tous les ans, de manière à donner le moyen de comparer les faits de même ordre dans la suite des temps. »

Un autre arrêté du 3 juillet 1878 a d'ailleurs étendu à cet album le bénéfice des décisions antérieures, qui autorisent la mise en vente des publications du ministère des travaux publics à un prix très-réduit, représentant seulement les frais du papier et du tirage.

En exécution de ces mesures, un album de six planches a été publié dans les premiers jours de cette année. Malgré l'accueil favorable qu'il a reçu du public, des sociétés savantes et du jury de l'Exposition de 1878, auquel il avait été communiqué en épreuves, on lui a reproché : d'abord l'exagération incommode de son format (1 mètre sur $0^{m},80$): en second lieu, la date à laquelle remontaient ses renseignements. En effet, les administrations ne fournissent guère leurs relevés d'un exercice qu'en moyenne à la fin de l'année suivante. Si l'on ajoute le temps nécessaire à la confection matérielle des dessins qui traduisent ces relevés, puis à la gravure et à l'impression, on s'explique bien comment l'album paru en janvier 1879 n'a pu donner que des résultats relatifs à l'année 1876. Or, aujourd'hui, sous peine de perdre en partie son efficacité et de méconnaître les exigences légitimes d'information qu'elle est tenue de satisfaire, la statistique doit s'attacher à fournir au Parlement, comme aux administrations publiques, des renseignements qui concilient le mieux possible ces deux conditions, malheureusement un peu contradictoires : l'actualité et la précision.

C'est pour améliorer à ce point de vue l'album de statistique graphique qu'il a été décidé que désormais, au lieu de paraître en janvier, il serait publié en juillet. De la sorte, il gagne six mois et peut fournir en 1879 les renseignements de 1877 (*).

Le nouvel album qui vient d'être mis en distribution et en vente consacre la première application de cette mesure.

Les 12 planches qui le composent, appartiennent à peu près dans une égale proportion aux deux grandes catégories qui se partagent les principaux modes d'expression mis à la disposition de la statistique graphique, et qui, dans un essai récent sur la nomenclature de ces modes (**), portent les noms de : *cartogrammes à bandes figuratives et de diagrammes orthogonaux*.

Les planches de fondation exigées par l'arrêté du 12 mars 1878 sont représentées dans cet album, comme dans celui qui l'a pré-

(*) Pour le tonnage des routes nationales, les comptages n'ayant lieu qu'à des intervalles assez éloignés, on a été obligé de se reporter au chiffre du dernier comptage, c'est-à-dire à l'année 1876.

(**) Les méthodes de statistique graphique à l'Exposition universelle de 1878. Rapport à la Commission permanente du congrès international de statistique, 17 juillet 1878, par M. Cheysson, directeur des cartes et plans.

cédé, par les quatre cartes figuratives qui expriment le tonnage des routes nationales, celui des voies navigables et des ports, enfin le tonnage et les recettes des chemins de fer. Les huit autres planches sont consacrées à l'histoire financière des six grandes compagnies de chemin de fer, au tonnage des ports depuis dix ans, enfin aux mouvements du commerce général et du commerce spécial depuis 1828.

Pour rendre ces dessins à la fois plus clairs et plus élégants, on a fait appel à divers artifices et notamment à l'emploi des couleurs multiples et des nuances d'une même couleur, qui s'obtiennent à l'aide d'un seul tirage par des hachures plus ou moins serrées. Il y a là toute une série de procédés qui se prêtent à une grande variété de combinaisons et qu'il s'agit de bien adapter aux convenances de chaque cas particulier.

Quant au format des planches, on a adopté sensiblement celui des documents parlementaires, qui est consacré par un long usage et qui les rend commodes à emporter avec soi, à consulter et à classer dans une bibliothèque. Mais cette réduction de format a naturellement conduit à diminuer les échelles des dessins, et par suite à recourir à des procédés d'exécution beaucoup plus soignés. Au lieu de l'autographie dont on s'était contenté pour les cartes murales du dernier album, on a cette fois employé la gravure sur pierre. Les cartes y ont gagné en finesse et en clarté, sans accroissement de la dépense, à cause des économies réalisées sur le papier et l'impression.

C'est ainsi que cet album, composé de douze planches et cartonné, peut être livré au public pour le prix de 6 fr. 50 chez les deux éditeurs qui ont le dépôt des publications du ministère. (Voir ci-après la liste et le prix de ces publications.)

Sans insister ici sur les services que peut rendre la statisque graphique et sur les enseignements qui se dégagent de l'album, il suffira de dire que, presque née d'hier, cette statistique étend chaque jour son domaine et le cercle de ses applications. Elle permet non-seulement d'embrasser d'un seul coup-d'œil la série des phénomènes, mais encore d'en signaler les rapports et les anomalies, d'en trouver les causes, d'en dégager la loi. Elle remplace dès lors avec avantage ces monceaux de chiffres, sous lesquels la vérité est comme enfouie, et constitue pour ainsi dire une langue universelle, qui facilite l'échange des idées et des travaux entre les savants de tous les pays.

Il nous a semblé que nos lecteurs apprendraient avec quelque intérêt ces détails sur une publication, qui fait revivre les tradi-

tions de M. Minard, et qui, à la condition d'être continuée dans l même esprit, est appelée à fournir aux ingénieurs de précieu renseignements pour l'étude des questions économiques dans leur rapports avec les travaux publics.

N° 58

Mise en communication, par voie ferrée de l'Algérie et du Sénégal avec l'intérieur du Soudan.—L'intéressant ouvrage de M. l'ingénieur en chef Duponchel, a appelé l'attention publique d'une manière toute spéciale sur la possibilité d'établir une voie ferrée reliant l'Algérie au Soudan. Les conclusions de cet ouvrage ont été soumises à l'examen d'une commission instituée par le ministre des travaux publics et composée comme suit :

MM. Tarbé de Saint-Hardouin, inspecteur général des ponts et chaussées, président ; Legros et Hardy, inspecteurs généraux des ponts et chaussées ; Meissonnier, inspecteur général des mines, Solacroup, directeur de la compagnie d'Orléans ; Jacqmin, directeur de la compagnie de l'Est ; Godin de Lépinay, ingénieur en chef des ponts et chaussées, secrétaire ; Pérouse, ingénieur des ponts et chaussées, secrétaire adjoint. M. le commandant Périer, délégué du ministère de la guerre a pris part aux travaux de la commission.

Les conclusions de la commission, favorable en principe à l'établissement du chemin de fer du Soudan, insistent sur la nécessité de faire des explorations destinées à lever autant que possible l'incertitude qui existe sur la topographie, le climat, la nature, les ressources et les habitants de certaines parties du Sahara, afin d'éviter les mécomptes et les complications militaires.

La question a été présentée à la Chambre des députés et au Sénat sous forme d'amendements et a reçu un accueil sympathique. En conséquence et conformément à un rapport présenté par M. le ministre des travaux publics, un décret a institué une commission supérieure pour l'étude des questions relatives à la mise en communication, par voie ferrée, de l'Algérie et du Sénégal avec l'intérieur du Soudan ; cette commission est chargée notamment de préparer et de diriger ou aider des explorations tendant à établir la possibilité pratique d'une telle voie et la meilleure direction à lui donner.

La composition de cette commission est donnée dans la deuxième partie des *Annales*, mais il nous a semblé qu'il n'était pas sans intérêt de rappeler en quelques lignes les phases par lesquelles a passé cette question.

N° 59

NOTE

SUR

L'ÉTAT ACTUEL DE L'INDUSTRIE DE L'ASPHALTE

[1879]

Par M. Léon MALO, ingénieur civil.

Il y a aujourd'hui dix-huit ans, les *Annales des ponts et chaussées* publièrent (*) un mémoire dans lequel nous exposions en substance ce qui, à cette époque, était déjà connu de l'asphalte. L'asphalte sortait à peine de son état embryonnaire; il n'y avait, alors, pas encore bien longtemps qu'il avait cessé d'être une curiosité minéralogique, un simple échantillon de laboratoire, pour devenir un des matériaux les plus utiles à l'art de construire; son industrie était jeune et inexpérimentée; il avait encore à faire plus d'une école et plus d'un faux pas avant d'acquérir d'une façon indiscutée la place à laquelle il a droit et que, depuis, il a conquise dans les travaux publics. Notre première étude l'avait pris dans son enfance; celle-ci le retrouve en pleine maturité, ses preuves faites, sa période d'expériences terminée, ses procédés d'extraction, de préparation, d'application, perfectionnés et consacrés par un long usage, mais, il faut le dire, non pas beaucoup plus connu qu'il y a dix-huit ans. Aussi croyons-nous le moment venu de compléter les notions que nous avons données en 1861; notions qui, naturellement, renfermaient plus d'une lacune que les progrès accomplis depuis lors ont comblées.

(*) 1861, tome I, 1er cahier.

Mis par les circonstances en situation de nous occuper de cette industrie d'une façon ininterrompue depuis vingt-deux ans, nous avons été conduit à l'étudier à fond et à créer une partie des méthodes et du matériel en usage aujourd'hui dans la pratique. Cette particularité et l'absence regrettable de toute autre publication spéciale nous autorisent, pensons-nous, à nous faire encore une fois le rapporteur de l'asphalte, de ses œuvres, de ses progrès, des recherches auxquelles il a donné lieu et des résultats de ces recherches; enfin, des conséquences qu'il est possible d'en tirer au profit des travaux publics.

En effet, sauf un très-remarquable mémoire publié par M. Homberg, inspecteur général des ponts et chaussées sur les voies asphaltées de Paris (Mémoire intéressant surtout par les indications statistiques) sauf encore quelques brochures allemandes, traitant la question surtout au point de vue géologique, nous ne sachons pas que rien de substantiel ait été écrit sur le sujet dans ces dernières années. Ce délaissement fâcheux ne s'explique pas. La méconnaissance des propriétés de l'asphalte, de ses qualités, des inconvénients de sa mauvaise préparation, des détails de son application, des caractères qui le distinguent de ses imitations et contrefaçons, a donné lieu cependant à d'assez graves, à d'assez fréquents mécomptes pour que la sollicitude des hommes spéciaux ait dû s'en préoccuper. Soit dans la confection des cahiers des charges, soit dans la surveillance et la réception des travaux, les ingénieurs et les architectes les plus habiles se sont plus d'une fois trouvés embarrassés par défaut de connaissances et de documents précis.

Telle est cette pénurie de publications spéciales, que notre mémoire de 1861 (mis plus tard en volume), a dû être consulté par la plupart des personnes qui ont voulu se renseigner sur les diverses questions relatives à l'asphalte. Mais, comme nous l'avons expliqué plus haut, les progrès

rapides de cette industrie n'ont pas tardé à rendre insuffisante notre première étude. Plusieurs des procédés qui y sont décrits ont été modifiés, beaucoup d'observations ont été faites depuis, qui ont conduit à en changer les méthodes et l'outillage; en un mot notre travail a vieilli, et quelques-unes de ses parties risqueraient aujourd'hui d'induire en erreur ceux qui voudraient encore le consulter. C'est ce qui nous a déterminé à publier celui-ci qui servira de complément et de correctif au premier.

Nous le diviserons, comme l'autre en deux parties : *Production* et *Application*. Chacune de ces deux parties comprendra un résumé rapide des définitions et descriptions générales; puis, un exposé aussi complet que possible des modifications survenues depuis 1861, ainsi que des observations auxquelles ces dix-huit années de pratique ont donné lieu.

PREMIÈRE PARTIE.

PRODUCTION.

I. — Origine et composition de l'asphalte.

Nous ne croyons pas que, depuis la publication de notre premier mémoire, aucune théorie nouvelle se soit produite au sujet des origines de l'asphalte et de son âge géologique; nous n'insisterons donc pas sur ce point. Nous nous bornerons à dire que toutes nos observations ultérieures nous ont confirmé dans notre opinion sur le mode probable de formation des gisements asphaltiques, telle que nous l'avons primitivement exprimée. Nous rappellerons, seulement en quelques mots et pour plus de clarté, que l'asphalte est un carbonate de chaux pur (*), tendre, poreux, appartenant

(*) Voir les analyses à la fin du mémoire.

à l'étage supérieur du terrain jurassique (Urgonien), imprégné naturellement et intimement d'une quantité variable de bitume qui lui donne, par sa présence, la couleur et le grain du chocolat foncé.

Si, par le moyen d'un dissolvant énergique, l'éther, par exemple, ou le sulfure de carbone, on extrait de l'asphalte son bitume d'imprégnation, on obtient une matière, visqueuse entre 20 et 40°, solide au-dessous, liquide au-dessus, d'un beau noir brillant, d'une transparence rougeâtre et dont la composition est, d'après M. Boussingault, la suivante :

Carbone.	87,00
Hydrogène.	11,20
Oxygène.	1,80
	100,00

La proportion de bitume entrant dans la composition de l'asphalte est très-variable; elle descend jusqu'au 2,25 pour 100 comme dans les minerais de Forens, de Musiège et quelques autres ; elle peut s'élever jusqu'à 12 p. 100 dans certaines roches du val de Travers.

Les conditions nécessaires pour qualifier un bon minerai d'asphalte sont les suivantes :

— Ne renfermer que du carbonate de chaux et du bitume ;

— Être imprégné intimement et régulièrement, sans interposition de grains de calcaire blanc ni de géodes ou cavités remplies de bitume libre;

— Fournir au dosage au moins 7 p. 100 et au plus 11 p. 100 de bitume semblable à celui que nous avons décrit plus haut, dépourvu d'huiles volatiles et assez fixe pour ne pas perdre plus de 2 p. 100 de son poids dans une cuisson de 6 heures à 225° centigrades.

La nécessité de ces dermières conditions sera expliquée au cours de ce travail.

II. — Situation géologique et topographique des mines d'asphalte.

Presque tous les gisements d'asphaltes affectent la forme d'une lentille formée de plusieurs bancs de calcaire bitumineux superposés et séparés les uns des autres par des bancs de calcaire blanc. Généralement, chaque lentille est coupée en deux par un cours d'eau dont les érosions ont mis à nu, à droite et à gauche, les affleurements des couches dans leur plus forte puissance. Souvent, ces affleurements ont été recouverts par des dépôts ultérieurs de marne ou de cailloux roulés. Quoi qu'il en soit, on comprend d'après ce que nous venons de dire que les gîtes d'asphalte sont d'ordinaire situés sur les flancs abruptes de certaines montagnes; ce qui permet de les attaquer par galeries sans le secours des puits. Nous ne connaissons guère de gisements asphaltiques qui ne soient placés dans de pareilles conditions.

Cette situation topographique habituelle des mines d'asphalte s'explique aisément au moyen de l'hypothèse que nous avons émise et à laquelle on n'a pas encore opposé de théorie plus acceptable. La distillation souterraine des grands végétaux qui, dans d'autres régions et d'autres circonstances ont fourni la houille, distillation produite par le feu central, a donné naissance à des vapeurs bitumineuses qui, s'échappant par l'une des fissures accidentelles de l'écorce terrestre, sont venues, près de la surface, imprégner des calcaires tendres, sous une pression considérable. Plus tard, après divers autres bouleversements géologiques, des cours d'eau, cherchant une issue, ont suivi la fissure agrandie par leurs érosions et coupé la lentille de calcaire où les vapeurs bitumineuses s'étaient épanouies en imprégnant les roches poreuses voisines de leur orifice de sortie. Il est peu de mines d'asphalte dont les apparences ne justifient absolument ces inductions et, jusqu'à ce qu'une hypo-

thèse plus satisfaisante soit venue remplacer celle-ci, nous estimons qu'elle doit être maintenue et servir, tant à expliquer la formation des mines connues qu'à aider à en découvrir de nouvelles.

Cette imprégnation, par l'excès de son énergie sans doute, à produit sur les roches imprégnées un effet dont l'industrie a su tirer, comme nous le verrons plus loin, un parti précieux; elle ne s'est pas contentée de pénétrer le calcaire, comme l'eau ou l'huile pénètrent le plâtre sec, par un simple phénomène de porosité, elle a modifié profondément sa constitution intime, elle a détruit la cohésion naturelle de ses molécules et remplacé cette cohésion par une sorte d'agglutinement dans lequel le bitume joue le rôle de colle; de telle sorte que, si l'on ramollit ce bitume par la chaleur, les molécules du calcaire se désagrègent aussitôt et se séparent. C'est sur cette singulière propriété qu'est fondé le système des chaussées en asphalte comprimé.

La puissance des bancs superposés varie entre 3 et 4 mètres. Les qualités et le grain du minerai sont souvent différents, de banc à banc; parfois des rognons plus ou moins volumineux de calcaire non imprégné se trouvent enfouis dans la masse, et, si l'on étudie avec attention cette particularité, on arrive à faire les remarques suivantes :

La plupart du temps, le calcaire ainsi emprisonné dans la roche asphaltique est de même nature que celle-ci, à l'imprégnation près. Il semblerait que la pression formidable à laquelle les vapeurs bitumineuses ont obéi s'est trouvée épuisée à un moment donné et que la force lui a manqué pour faire pénétrer ces vapeurs plus avant.

D'autres fois, les rognons de calcaire non imprégnés sont plus durs et plus compacts que la roche laitumineuse encaissante et, alors, il faudrait croire que les vapeurs, affluant avec abondance, se sont arrêtées impuissantes devant ces obstacles impénétrables en se condensant sur leurs parois.

Dans la suite des temps, le bitume, ainsi accumulé sur la barrière qui lui avait été opposée, se serait écoulé lentement par les fentes de la roche déjà imprégnée et serait venu suinter au dehors, comme on le voit à l'intérieur de certaines mines, ou sur les parois de certaines galeries d'exploitation. Ces suintements, que l'on serait porté à prendre pour l'indice d'un excès de richesse en bitume dans l'asphalte sont au contraire presque toujours le signe d'une imprégnation incomplète; ils indiquent à peu près sûrement, ou qu'il existe dans l'intérieur des gisements des rognons plus ou moins gros de roche compacte non imprégnée, ou que le calcaire bitumineux est grossier, parsemé de petits grains de calcaire dur que le bitume n'a pu pénétrer et qu'il s'est borné à contourner ou à envelopper. Cette circonstance importante doit être signalée aux personnes qui ayant à examiner et à apprécier des mines d'asphalte, pourraient se méprendre sur le caractère de ces indices.

Le plus souvent, les couches d'asphalte sont interposées entre deux bancs de calcaire blanc plus dur. Dans les bons gisements, la séparation de la couche en exploitation, avec son toit et son mur, est très-nette, et les deux matières se détachent l'une de l'autre avec facilité. Dans ce cas, on donne aux galeries une section presque rectangulaire et aux piliers une forme à peu près cubique. Mais il n'en est pas toujours ainsi. Trop souvent le toit est marneux par suite des érosions et des dépôts dont nous avons parlé tout à l'heure; alors on est obligé de tailler les voûtes en ogive, en laissant à la clef une épaisseur d'asphalte de $0^{m},50$ à 1 mètre, et même, dans ce cas, on est ordinairement tenu de boiser, afin d'éviter la chute des blocs qui à la longue se détachent du toit. Car l'asphalte, surtout quand il est de bonne qualité, est une matière molle incapable d'une résistance propre; sans compter que les meileurs gisements sont d'habitude découpés dans tous les

sens par des failles et des glissements qui leur enlèvent toute solidité. L'asphalte maigre exige infiniment moins de précautions et présente beaucoup plus de sécurité pour les ouvriers.

Nous n'avons pas à constater de découverte sérieuse de mines d'asphalte depuis 1861. Celles que nous avons citées dans notre premier mémoire comme étant en possession de défrayer les travaux d'application en Europe ont conservé leur situation. Néanmoins nous devons noter qu'un gisement nouveau a été reconnu en France, près du village de Lelex, dans la vallée de la Valserine, affluent du Rhône qui se jette dans le fleuve à Bellegarde; ce gisement n'étant pas encore en exploitation, ses produits nous sont inconnus. En Italie, d'importants gîtes bitumineux ont été inventés près d'Ancône; leur centre est à Chieti, station du chemin de fer d'Aquila à Pescara; ce sont moins des asphaltes que des conglomérats, auxquels le bitume sert de ciment; on les exploite, soit pour en extraire le bitume natif disséminé dans les interstices de la roche, soit pour pulvériser toute la masse et en faire du mastic qui, à proprement parler, n'est qu'une sorte de *factice* (voir plus loin les explications sur ce produit). D'autres ont été trouvés dans la province de Caserte; ces derniers sont très-répandus à Naples et à Rome sous le nom d'asphalte de Rocca-Secca; ils servent surtout aux terrasses qui, comme l'on sait, couvrent la plupart des maisons de ces villes, de la première surtout, mais ne donnent que de très-médiocres résultats. Ceux de Majella (Chieti) s'emploient surtout dans l'Italie du Nord; depuis quelque temps il en est expédié une certaine quantité en Pologne. Par la raison que nous venons de dire, son analogie avec le *factice*, l'asphalte de Majella, mis en mastic et appliqué en surfaces d'une certaine étendue, se contracte par le froid jusqu'à un demi-millimètre par mètre, ce qui est une détestable condition pour l'établissement des terrasses, qui se fendent en

tous sens. On en a fait cependant de bons dallages d'intérieur. D'autres asphaltes moins défectueux ont été découverts à Brazza, en Dalmatie; ces asphaltes ont la propriété spéciale de pouvoir s'appliquer, sans couler par les chaleurs, en pentes assez raides sur les toitures et les terrasses. Ajoutons qu'il n'est peut-être pas de pays où le *factice* soit plus répandu qu'en Italie et où il ait fait plus de victimes.

Nous ne sachons pas que d'autres mines d'asphalte se soient révélées dans ces derniers temps, du moins en Europe, et nous nous en étonnons ; il nous paraîtrait surprenant que, dans toutes les immenses régions calcaires qui couvrent une partie du globe, la nature se fût montrée aussi avare de ce précieux produit. Si notre hypothèse sur sa formation est vraie, nous ne pouvons guère admettre que le phénomène géologique qui lui a donné naissance ne se soit pas répété des centaines, peut-être des milliers de fois; seulement, il est probable que, sur la plupart des points où il s'est manifesté, les érosions ont été ultérieurement recouvertes par des alluvions, par des amas de marne, par des invasions de cailloux roulés, sous lesquels il faut aller reconnaître les affleurements bitumineux ; ou les recherches ne se font pas avec l'énergie et les connaissances suffisantes, ou elles s'égarent. Les mines actuellement en exploitation sont sans doute en mesure de pourvoir à la consommation actuelle pendant longues années; mais le rôle de l'asphalte commence à peine; à mesure que les besoins de bien-être public et les goûts d'embellissements s'accroîtront dans les villes, ce rôle augmentera en importance, et le jour où, dégoûté des contrefaçons ou mieux mis en état de les reconnaître, on aura renoncé à la coûteuse économie qu'elles procurent, les débouchés de l'asphalte prendront certainement des proportions qu'il est sage de prévoir dès aujourd'hui. Les recherches des géologues seront donc très-utilement menées dans cette

direction, sinon en vue du présent, du moins dans l'intérêt de l'avenir.

III. — Exploitation.

L'extraction de l'asphalte se fait au moyen de la poudre de mine, aucun gaz explosif ne s'y produisant. On a essayé de substituer à la poudre la dynamite, mais sans succès; l'asphalte étant une roche relativement élastique, les poudres brisantes, comme la dynamite, perdent chez lui la plus grande partie de leurs avantages.

Les trous de mine s'y percent de deux façons différentes : lorsque le minerai présente une certaine dureté, on emploie le burin et la massette, ou la barre à mine; quand il est tendre, comme se présente ordinairement l'asphalte pur et de bonne qualité, on se sert de la tarrière. Souvent un trou de mine traverse plusieurs rognons de calcaire dur, et, dans ce cas, l'ouvrier se trouve obligé de prendre alternativement le burin ou la barre à mine, et la tarrière; c'est cette circonstance surtout qui empêche d'utiliser, dans les mines d'asphalte, les perforateurs mécaniques, dont plusieurs, très-simples et très-pratiques, ont été remarqués à l'Exposition de 1878.

Le minerai extrait est conduit au jour, soit par voitures, soit par voies ferrées, ordinairement avec facilité; les couches d'asphalte étant généralement, ou horizontales, ou peu inclinées; on n'y trouve pas de ces redressements considérables ni de ces rejets énormes qui se voient dans les mines de houille; appartenant à une formation plus récente, les gisements d'asphalte ont été moins bouleversés.

Par suite d'une propriété que nous avons définie et expliquée un peu plus haut, lorsque la roche asphaltique est exposée au soleil, elle se ramollit, se fend, s'écrase et finit à la longue par tomber en poussière. Il en résulte que, s'il est entassé en plein air dans la saison chaude, les blocs se

›risent peu à peu sous leur propre poids, et il se produit ıne grande quantité de menu qui comble tous les vides. ,e minerai d'asphalte étant toujours destiné à se faire ulvériser tôt ou tard, cette pulvérisation naturelle ne pré- ente d'autre inconvénient que d'en compliquer un peu le ansport. C'est cette propriété spéciale qui, comme nous disons plus haut, a mis sur la voie du système, actuelle- ıent si répandu, des chaussées en asphalte comprimé. Des locs tombés des voitures de service sur les chemins d'ex- oitation, réduits en poussière sous l'action du soleil et mprimés par les roues de ces voitures, ont fini par don- r de véritables chaussées qui, après plus d'un demi- ècle d'existence, résistent encore parfaitement. En hiver, tte pulvérisation spontanée n'a jamais lieu, la roche reste re et se casse aussi difficilement que le calcaire ordi- ire.

Les circonstances de l'exploitation de l'asphalte étant, à détail près, les mêmes que celles de l'extraction des ıtériaux grossiers ou des minerais en galerie, nous n'in- terons pas davantage sur ce sujet, les particularités spé- les à la matière étant d'ailleurs de nature à ne pouvoir e que difficilement décrites et consistant en certains ırs de main qui ne sauraient être bien compris que dans e visite aux mines.

IV. — Fabrication du mastic d'asphalte.

Nous avons donné, dans notre travail de 1861, des indi- ions assez complètes sur la fabrication du mastic. Nous n reparlerons ici que pour signaler les modifications qui t été apportées à cette opération, soit dans ses procédés, t dans son matériel spécial.

Pulvérisation. — En 1861, on ne connaissait guère utre moyen pratique de pulvérisation que la *décrépita- n* par la chaleur et le broyage à froid par les meules

verticales ou les moulins à noix. Nous avons expliqué précédemment en détail ces divers procédés. Aujourd'hui dans les mines d'asphalte importantes, on les a complétement abandonnés pour leur substituer le concasseur à hérisson et le broyeur à force centrifuge dit *système Carr.*

On fait d'abord passer les gros blocs de roche entre deu cylindres en fonte à dents d'acier animés chacun d'un vitesse différente, de façon que le concassage ait lieu pa déchirement et non par laminage. Les formes et dimension de cet appareil ne peuvent être indiquées d'une manièr précise, parce qu'elles dépendent de la consistance et de l nature des roches à concasser. Sur ce point, comme d'ai leurs sur beaucoup d'autres relatifs à l'industrie de l'a phalte, on doit tenir compte surtout des circonstances des besoins spéciaux à satisfaire; les sources de productic étant fort rares, il n'a pas été possible d'établir des lois des formules empiriques suffisamment justifiées pour po voir être appliquées sans danger; on doit avant tout s'i spirer des conditions particulières devant lesquelles on trouve et que l'homme du métier peut seul apprécier. C'e pourquoi nous nous abstiendrons, dans ce qui va suivr de poser des règles générales qui pourraient induire erreur les intéressés.

Le minerai, jeté dans le concasseur par blocs de 1c 20 kilog., en sort à l'état de menus fragments de 30c 400 grammes au maximum. Un concasseur à *hérisson,* prenant de 10 à 12 chevaux de force, peut casser, à l'heu de 8 à 12 tonnes de roche, suivant la nature de cette roch.

La pulvérisation est achevée dans le broyeur à fo centrifuge dit « broyeur Carr. »

Le broyeur Carr est un appareil trop connu aujourd'h pour qu'il soit utile d'en faire ici la description. Il est, a reste, employé à la pulvérisation de produits très-dive depuis la mouture du blé jusqu'au broyage du silex. n autre appareil, également fondé sur le principe de la fo

centrifuge, mais à axe vertical, le broyeur *Vapart*, semble destiné à rivaliser avec le *Carr*. Toutefois, sa pratique étant encore toute récente, il n'est pas possible de se prononcer définitivement sur sa valeur relative.

Un broyeur Carr de $1^{m},30$ de diamètre, exigeant de 22 à 25 chevaux de force et marchant à 500 tours par minute, peut pulvériser environ 5 tonnes de roche d'asphalte à l'heure. Si la roche est mouillée, ce rendement diminue sensiblement; il peut arriver même que la poudre projetée sur les parois intérieures de l'enveloppe s'y accumule au point de finir par arrêter complétement l'appareil; il y a donc toujours grand intérêt à pulvériser de la roche sèche.

Lorsque le broyeur à force centrifuge est actionné par un moteur spécial dont la marche peut être, par conséquent, maintenue à une vitesse uniforme, la poudre obtenue est d'une finesse régulière et peut se passer de blutage. Mais si le broyeur prend sa force sur un moteur commun à plusieurs outils, si, par suite, sa vitesse varie, la poudre produite étant plus ou moins fine, suivant que la vitesse de l'appareil est plus ou moins grande, il en résulte une inégalité de grain qui oblige à faire passer la poudre par un tamis. On admet généralement pour ce tamis une maille de 3 millimètres d'ouverture.

Cuisson. — Le mode et les conditions de la cuisson ont peu changé. Comme précédemment, on jette dans la chaudière une petite quantité de bitume libre, variable suivant la richesse bitumineuse de la roche, et l'on ajoute, de quart d'heure en quart d'heure, la poudre par doses réglées, de façon qu'en cinq heures environ la totalité de la poudre qui doit entrer dans la composition du mastic soit admise. La pâte est malaxée sans interruption par des agitateurs mécaniques. Nous avons reconnu que, dans des chaudières de 3.000 kilog., la cuite doit durer environ cinq heures et demie à une température qui ne doit pas descendre au-dessous de 175 degrés ni s'élever au-dessus de 230 degrés;

mais elle doit atteindre ce chiffre dans la dernière demi-heure de l'opération. Il serait dangereux de dépasser la température de 230 degrés, car l'on risquerait de brûler la pâte, c'est-à-dire de vaporiser les huiles fixes du bitume; mais il est nécessaire d'en approcher pour chasser les huiles trop légères qui, en se volatilisant à la longue au contact de l'air, lorsque le mastic est posé en terrasses ou en trottoirs, le rendraient friable et cassant.

Cette question de la cuisson est la plus importante de celles qui se rattachent à la fabrication du mastic; elle influe dans une proportion considérable sur la durée des ouvrages en asphalte. Que le mastic soit, ou trop, ou insuffisamment, ou irrégulièrement cuit, et la qualité des travaux s'en ressentira certainement. Aussi est-ce l'un des détails qui doivent le plus préoccuper les chefs d'établissements. Dans les anciennes usines, comme celle de Pyrimont (Seyssel), la tradition s'en transmet pour ainsi dire de père en fils chez les chefs de cuites, et certains ouvriers en acquièrent une telle habitude qu'il devient difficile de ne pas la laisser dégénérer en routine. Ce doit être aussi le souci des ingénieurs, chargés d'élaborer un cahier de charges pour des travaux d'asphalte, d'y insérer les clauses nécessaires pour que cette condition essentielle soit rigoureusement observée.

Coulée. — Le mastic est coulé dans des moules de formes diverses; chaque usine a la sienne, et il n'est pas rare que les formes adoptées par des établissements en renom soient imitées par les autres. Il en est de même des marques de fabrique, que l'on copie autant qu'on le peut faire sans tomber sous le coup de la loi sur les contrefaçons, et il n'est pas jusqu'à la couleur de la terre glaise, dont, en certaines usines, on enduit les moules pour empêcher les pains de mastic d'y adhérer, qui ne soit recherchée par les imitateurs. Cette terre laisse au pain une couleur grisâtre qui, pour beaucoup d'applicateurs, est la véritable marque

de fabrique : aussi est-elle l'objet de toute la sollicitude des contrefacteurs.

V. — Bitume.

Nous avons expliqué que, pour transformer la roche asphaltique en mastic, on la fond dans un bain de bitume naturel. Cette cuisson donne à l'asphalte la propriété de se mettre lui-même en fusion quand on le chauffe, au lieu de tomber en poussière comme lorsqu'il est à l'état de minerai. Mais cette nouvelle fusion elle-même ne peut s'accomplir que dans les mêmes conditions, c'est-à-dire que l'on doit faire fondre le mastic, lui aussi, dans un bain de bitume. Moyennant cette précaution, le mastic peut être refondu indéfiniment, le bitume ajouté ayant pour rôle, non pas seulement de tenir lieu de fondant, mais encore de restituer au mastic celui que l'évaporation lui a enlevé à chaque cuisson.

On comprend dès lors que ce bitume doit être, autant que possible, de même nature que celui qui se trouve déjà dans les pores de l'asphalte à l'état de matière imprégnante. Ce bitume d'imprégnation joue vis-à-vis celui qu'on lui ajoute le rôle de véhicule destiné à lui frayer le chemin et à l'introduire plus aisément jusque dans les plus intimes profondeurs du calcaire, où lui-même réside déjà, de la même façon qu'une tache d'huile sur une étoffe facilite l'absorption des autres matières huileuses qu'on laisse tomber sur elle.

Dans les premiers temps de l'industrie de l'asphalte, cette condition a été rigoureusement remplie. On extrayait des molasses bitumineuses imprégnées par les mêmes voies, dans les mêmes régions et vers la même époque géologique, le bitume qu'elles renferment et qu'elles cèdent à un simple lessivage à l'eau bouillante : c'est ce bitume qu'on utilisait dans la cuisson du mastic. Mais la grande extension donnée aux travaux d'asphalte, le peu d'abondance des

molasses bitumineuses riches, la difficulté de retirer une petite quantité de produit utile d'une gangue énorme (la teneur moyenne des sables bitumineux ordinaires n'excède guère 4 à 5 p. 100), et par-dessus tout la nécessité de produire le mastic à bon marché pour pouvoir combattre efficacement la contrefaçon, ont fait renoncer à cette espèce de bitume, excellent, mais devenu inabordable par sa rareté et par son haut prix.

Ce fut dès lors un problème posé, et, nous sommes forcé de le reconnaître, non encore résolu, de trouver un bitume fixe, d'origine minérale, d'un prix accessible et d'une assez grande abondance pour qu'il fût permis de penser qu'il ne manquerait jamais sur le marché.

Jusqu'à cette heure, la matière qui semble avoir le mieux rempli ces conditions est le *bitume de Trinidad épuré.*

Il existe dans l'île de Trinidad (Antilles) d'immenses lacs d'une sorte de boue bitumineuse qui a émergé de l'intérieur du sol et est venue se solidifier à la surface; cette boue, transformée par le refroidissement en une roche légère et facile à briser, contient en moyenne la proportion suivante de bitume (en outre d'une quantité d'eau qui s'élève quelquefois jusqu'à 30 p. 100) (*) :

Minerai de Trinidad desséché.	Bitume pur.	52 p. 100.
	Argile impalpable. .	48 —

On extrait cette roche en pratiquant dans le lac de simples excavations à ciel ouvert, et on la transporte telle quelle en Europe, où elle est purifiée d'une grande partie de son argile par la méthode suivante :

On chauffe dans des bâches en fonte demi-cylindriques une certaine quantité d'huile lourde de schiste ou de goudron provenant du traitement de ces huiles. Ce goudron, liquide à la température de 25 à 30 degrés, jouit de la pro-

(*) Voir l'annexe A à la fin du mémoire.

priété d'être fixe, c'est-à-dire de ne plus perdre une quantité appréciable de son poids à la température *maxima* de cuisson du mastic. Lorsqu'il est bien chaud, on y verse, par doses successives, environ une fois et demie son poids de bitume de Trinidad brut, autant que possible pulvérisé, ou tout au moins cassé en petits morceaux; on chauffe ensuite pendant plusieurs heures, en brassant continuellement la matière, soit à bras d'homme, soit mécaniquement, au moyen d'agitateurs. Vers la huitième ou la neuvième heure, il se produit un phénomène que les ouvriers nomment la *mousse;* le liquide entre en ébullition tumultueuse, comme fait l'acide sulfurique, dans lequel on met un morceau de calcaire; son volume double à peu près. Au bout d'une demi-heure ou trois quarts d'heure, la mousse tombe; on laisse alors la matière reposer pendant une heure et demie ou deux heures, en continuant à chauffer doucement, afin de laisser se précipiter l'argile; puis, un peu avant la douzième heure, on décante avec précaution, de manière à agiter le moins possible le dépôt.

Le bitume épuré qu'on obtient par cette décantation contient encore une certaine quantité d'argile. Le meilleur bitume est celui qui en renferme le moins; mais cette argile est tellement fine qu'il n'existe pas de moyen industriel de l'éliminer complétement; on n'y parvient que par des procédés de laboratoire.

Quoique ce bitume soit aujourd'hui le plus répandu de tous dans l'industrie de l'asphalte et le plus fréquemment employé, il est certain qu'il ne remplit qu'imparfaitement les conditions voulues pour une bonne fabrication, conditions dont la première serait de n'introduire dans le mastic qu'un bitume exactement semblable à celui qui existe déjà par imprégnation naturelle dans les pores de l'asphalte. Jusqu'à présent ce bitume parfait ne s'est trouvé qu'à l'état d'agglutinant de certains sables bitumineux tels que ceux de Bastennes, dans les Landes; de Pyrimont-Seyssel, dans

l'Ain; de Chamalière et Lussat, en Auvergne, ou de certains poudingues comme ceux de Chieti, en Italie; nous avons expliqué comment et pourquoi ces bitumes, autrefois employés, ont dû être abandonnés; il est à souhaiter que d'autres mines plus abondantes ou que des procédés d'extraction plus pratiques se découvrent afin de permettre à ces bitumes natifs purs de reprendre leur place dans les travaux; ce sera une grande amélioration obtenue et une garantie de plus de durée des ouvrages d'asphalte. Jusque là le bitume de Trinidad, plus ou moins épuré, paraît être celui qui les remplace avec le moins de désavantage.

Du bitume factice. — On appelle généralement *bitume factice* (nous conserverons cette dénomination, quoiqu'elle soit fausse, parce qu'elle est passée dans le langage ordinaire des travaux) une imitation du mastic asphaltique qui consiste à substituer à l'asphalte du calcaire blanc et d'autres matières non bitumineuses.

Nous avons donné dans notre première note quelques détails sur la façon dont se fabrique le bitume factice; nous ne nous répéterons pas; néanmoins cette matière a pris depuis une quinzaine d'années de tels développements, elle a causé tant de mécomptes et fait tant de dupes, que nous ne pouvons nous dispenser d'ajouter quelques indications nouvelles à celles que nous avons déjà données.

Toute matière, précieuse à quelque degré, provoque nécessairement des imitations; imitations parfaitement légitimes lorsqu'elles ne cachent pas leur origine et qu'elles n'ont d'autres visées que de reproduire à bas prix et aussi exactement que possible les propriétés et les avantages de la matière imitée. Le mastic d'asphalte a la sienne, disons-nous, qui est le *bitume factice.* Dans le bitume factice, la roche d'asphalte naturel est remplacée par une matière quelconque à bas prix, telle, par exemple, que rebuts de carrières, poussière de routes macadamisées, terre à four, débris d'ardoise, etc. Non-seulement ces matériaux

sont intrinsèquement de médiocre valeur, mais ils se trouvent partout; ils n'ont pas à supporter les lourds frais de transport qui pèsent sur l'asphalte naturel, pour peu que le lieu d'emploi soit éloigné des gisements, lesquels, comme je l'ai fait remarquer, sont généralement répartis sur une ligne qui suit du nord au sud notre frontière de l'Est. On pulvérise ces matériaux et on les fait cuire avec une certaine quantité de n'importe quel bitume, goudron ou brai de gaz, de la même façon que le mastic d'asphalte naturel. On obtient ainsi une matière en apparence parfaitement semblable à celui-ci; mais seulement en apparence: on comprend en effet que, quelle que soit l'intensité de la cuisson, le bitume ne saurait pénétrer le calcaire aussi énergiquement, et se maintenir dans ses pores avec autant de ténacité, que lorsque ce calcaire a déjà été imprégné par les vapeurs bitumineuses provenant des distillations géologiques, vapeurs qui, poussées par des pressions incommensurables, l'ont envahi jusque dans ses atomes. L'expérience a du reste confirmé les inductions de la théorie; tandis que le mastic d'asphalte naturel, coulé en couches minces, a résisté de longues années à son exposition à l'air sans que la déperdition de son agglutinant bitumineux excède un quart de millimètre de profondeur environ, le *bitume factice* placé dans les mêmes conditions s'est toujours desséché rapidement, s'est écaillé, fendillé, et finalement s'est détruit.

Le *bitume factice*, quand son emploi est restreint à certains usages, peut cependant rendre des services importants, si l'on a soin de le maintenir dans un certain ordre de travaux, ceux par exemple où il est mis à l'abri du contact de l'air et de l'usure résultant de la circulation. On l'a utilisé au lambourdage des parquets d'appartements pour arrêter l'humidité des rez-de-chaussée. Dans tous les ouvrages analogues il peut justifier la préférence qu'on lui accorde en faveur de son bas prix; mais nous ne le con-

seillerons jamais pour des applications où la matière doit subir les intempéries des saisons, supporter une certaine fatigue ou être exposée au fendillement, tels que trottoirs, chapes de voûtes, revêtements d'ouvrages fortifiés, etc.

Le *bitume factice* a donc sa place légitimement marquée dans les travaux de construction et il n'y a pas de doute qu'avec le temps les perfectionnements apportés à sa production n'agrandissent cette place; mais nous devons dire que ces agissements ne sont pas toujours loyaux et que trop souvent c'est grâce à sa similitude avec l'asphalte naturel qu'il pénètre frauduleusement sur les travaux. Les administrations publiques, qui l'ont proscrit de tous les cahiers des charges, éprouvent souvent les plus grandes difficultés à l'empêcher de se glisser sur les chantiers; elles n'ont eu jusqu'ici d'autre moyen que de prescrire les marques de fabrique des mines connues et qui doivent être imprimées sur chaque pain de mastic. Nous reviendrons sur ce sujet plus loin, quand nous traiterons des précautions à prendre dans la confection des cahiers des charges.

Avant de laisser ce sujet, nous tenons à signaler les intéressantes recherches qui ont été faites dans ces derniers temps en vue de créer un procédé d'analyse pratique qui permette de reconnaître facilement la présence du brai de gaz dans les mastics bitumineux. M. l'ingénieur en chef Durand-Claye, directeur du laboratoire de l'École des ponts et chaussées, nous a communiqué une note contenant le résultat de ses investigations et qu'il a bien voulu nous autoriser à publier; on trouvera cette note aux annexes, à la fin de notre travail (pièce B). De son côté M. Deval, chef du laboratoire de la 5e section des travaux de Paris, a entrepris de résoudre le même problème sous la direction de M. Baraban, ingénieur de cette section. Nous ne connaissons que vaguement ce dernier procédé; nous croyons seulement qu'il utilise la benzine comme réactif. Dissoutes dans la benzine, les matières infectées de brai de gaz lui

communiquent certains reflets verdâtres que M. Deval espère pouvoir définir et classer de façon à en former une gamme qui révèle la proportion de brai contenue dans ces matières et de saisir les moindres traces de ce poison de l'industrie des asphaltes. Nous souhaitons vivement que ces différentes recherches aboutissent à créer une méthode assez efficace et assez simple pour pouvoir être placée dans la main du premier surveillant venu.

DEUXIÈME PARTIE.

APPLICATION.

I. — Applications de l'asphalte brut.

Nous avons expliqué plus haut que l'asphalte peut s'employer, soit à l'état brut et sans autre préparation que son broyage et son chauffage à une température peu élevée, soit à l'état de mastic fusible. Nous allons examiner successivement ces deux modes d'emploi.

Nous avons exposé dans les pages précédentes comment le minerai asphaltique s'il est chauffé au feu, ou simplement par les rayons du soleil, se désagrége et tombe en poussière. Le bitume d'imprégnation qui sert de liant aux grains de calcaire, se ramollit, abandonne sa propriété agglutinante, et chacun de ces grains, séparé de ses voisins, roule, revêtu de sa mince enveloppe de bitume. Puis, la matière s'étant refroidie, cette enveloppe microscopique se durcit, en sorte que la roche, ne s'étant pas réagglutinée, reste à l'état de poussière. Mais si l'on réchauffe cette poussière, le bitume enveloppant chaque grain se ramollit de nouveau, redevient agglutinant; pour peu que l'on comprime la poudre, tous les grains se recollent entre eux, et, si on la laisse refroidir, ils restent agrégés les uns aux

autres comme ils l'étaient dans le minerai lui-même. C'est sur ce principe qu'est fondé le système des chaussées dites en *asphalte comprimée*.

Nous avons dit dans notre précédent mémoire, quelles furent les origines de ce procédé et ses premiers pas à Paris de 1858 à 1861. A partir de 1861, son extension fut considérable et rapide; de Paris, il rayonna sur toutes les autres grandes villes d'Europe; en 1871 il eut un moment d'arrêt causé par les événements de cette année fatale; depuis lors, il a repris son essor jusqu'à ces derniers mois où il a éprouvé de nouvelles traverses, dont nous examinerons plus loin la raison.

Les avantages et les inconvénients de la chaussée en asphalte comprimée, sont aujourd'hui connus de tout le monde ; il est à peine nécessaire de les énumérer ici. Toutefois nous croyons que beaucoup de ces inconvénients tiennent à des imperfections de pratique auxquelles il est facile de remédier. L'un des principaux objets de ce mémoire est précisément de rechercher et d'indiquer ces remèdes.

Nous allons d'abord exposer, d'après l'étude assidue que nous avons faite pendant vingt ans de ce sujet, à quelles conditions indispensables on doit obéir quand on veut construire une chaussée en asphalte comprimé aussi parfait que possible, nous prendrons ensuite à partie chacun des accidents qui ont été signalés dans ces dernières années, et qui récemment, dans les chaussées de Paris ont presque atteint les proportions d'un désastre. Nous essayerons de restituer à ces mécomptes leurs vraies causes, et de démontrer qu'elles tiennent beaucoup moins au système lui-même qu'à la manière dont il a été mis en œuvre.

Construction des chaussées en asphalte comprimé. — Assiette de la chaussée. — La première de toutes les conditions de stabilité et de durée d'une chaussée en asphalte, c'est d'être assise sur un béton inflexible et imperméable.

La croûte asphaltique de $0^m,04$ ou $0^m,05$ d'épaisseur, que l'on place sur ce béton n'est pas destinée à offrir une résistance propre; elle est comme une couverture de gutta-percha qui serait interposée entre le sol solide et les roues des voitures, chargée de protéger celui-là contre celles-ci, par son élasticité relative ; lui demander davantage serait méconnaître absolument son rôle et c'est principalement à l'oubli de ce précepte que sont dues toutes les mésaventures de l'asphalte comprimé ; celles, du moins, qui n'ont pas eu pour cause la mauvaise qualité de la matière employée. Le sol doit être, préalablement à toute installation, rendu solide par un damage énergique ; les tranchées d'eau ou de gaz fraîchement remblayées, doivent être pilonnées jusqu'à ce que le terrain ait acquis la même résistance que le sol circonvoisin. Sur ce sol, on coulera une couche de béton de ciment à prise lente, genre Portland, de 0,13 à 0,20 d'épaisseur, suivant le plus ou moins de consistance du sous-sol. Il est absolument indispensable que l'asphalte en poudre ne soit posé que sur du béton parfaitement sec dans toute son épaisseur, nous expliquerons plus loin pourquoi ; or, dans les grandes villes, à Paris surtout, les exigences de la circulation ne permettent pas de barrer les rues longtemps, et ne laissent pas par conséquent au béton de chaux le temps de sécher ; c'est pourquoi le béton de ciment ou de chaux à prise rapide, analogue à la chaux du Theil, est rigoureusement obligatoire ; on n'a eu que trop souvent lieu de se repentir de n'avoir pas obéi à cette indispensable prescription.

Voici les proportions de matériaux qui nous semblent le plus convenables pour ce genre de béton.

Mélanger à sec :
- 5 brouettes de sable de rivière.
- 3 id. de caillou lavé.
- 1 id. de ciment de Portland (ou analogues), parfaitement cuit et broyé très-fin.

On donne au mélange juste la quantité d'eau nécessaire

pour que le bétonnier puisse l'étaler à la pelle plate et carrée. Il est superflu de mettre un enduit sur le béton ; on ajoute seulement un peu de mortier sur les parties flacheuses de la surface afin de rétablir un profil parfaitement régulier. On doit veiller avec soin à ce que cette couche de béton ne présente aucune solution de continuité, aucune fissure par où l'humidité sous-jacente puisse remonter; on a vu certaines parties de chaussées en asphalte se détériorer uniquement parce que les ouvriers bétonniers avaient oublié de retirer les chevilles en bois, dont ils se servent pour arrêter leurs planches et qui en pourrissant, ont ménagé une entrée à l'humidité.

Nous avons dit que l'enduit sur le béton était inutile ; nous pourrions ajouter qu'il est souvent nuisible ; en effet, outre qu'il sert quelquefois aux entrepreneurs, ou à leurs sous-traitants, pour dissimuler un mauvais béton, il peut arriver qu'il n'adhère pas complétement à ce béton, et que le pilonnage le brise à travers la couche d'asphalte et le réduise en poussière, ce qui amène inévitablement des gerçures ou des flaches dans la croûte bitumineuse. Enfin l'enduit retarde la prise et l'asséchement du béton.

Le règlement du profil transversal de la chaussée est un point d'une grande importance sur lequel nous devons nous arrêter un moment. On comprend que l'asphalte comprimé (surtout si l'on a soin d'éviter les flaches), est une surface tellement lisse, que l'écoulement des eaux s'y fait presque sans pente avec une grande facilité. D'autre part, cette chaussée étant par certains états atmosphériques, plus glissante que le pavé, si le bombement en est trop prononcé, les chevaux sont exposés au glissement latéral, le pire de tous. Il y a donc lieu de prescrire que la pente *maxima* du profil transversal n'excédera pas 0,02 par mètre. On doit encore réduire davantage cette inclinaison pour les chaussées exposées à un charroi considérable et fatiguant, comme celui des gros matériaux.

Nous avons signalé parmi les principaux ennemis de l'asphalte comprimé, les tranchées d'eau et de gaz; il serait à souhaiter que cet antagonisme se résolût en faveur de l'asphalte, et que cette lutte fut l'occasion si désirable de l'abolition d'un système qu'il est permis aujourd'hui de traiter de barbare. Il est étrange, en effet, que pour établir un branchement, pour rechercher une fuite, pour le moindre accident survenu à une conduite, on soit encore obligé de bouleverser une chaussée, d'entraver la circulation et de pratiquer en pleine rue des tranchées dangereuses et nauséabondes. Les travaux de ce genre sont incommodes et dispendieux pour les chaussées pavées, elles le sont plus encore pour les chaussées asphaltées. A Londres les conduites d'eau et de gaz sont placées dans les égouts, et l'on s'en trouve bien; pourquoi n'en est-il pas de même à Paris; pourquoi, au droit de chaque maison, le réseau n'a-t-il pas son branchement spécial, dont les tuyaux seraient accessibles sans qu'il fût nécessaire pour cela de jeter le trouble dans la voirie? Au point de vue de la commodité du public, ce serait excellent; au point de vue particulier du bon entretien et de la durée de la chaussée en asphalte, ce serait inappréciable.

Pose de la poudre. — On ne pulvérise plus l'asphalte qu'à froid; on a renoncé à la pulvérisation par *décrépitation* qui desséchait la matière en brûlant ou évaporant une partie de son bitume d'imprégnation. Dans les grands établissements, le broyage s'effectue au moyen de l'apparareil à force centrifuge dit *système Carr*, ainsi que nous l'avons indiqué au chapitre *fabrication*. Cette poudre est ensuite chauffée dans des appareils rotatifs analogues aux brûloirs à cafés et qui peuvent contenir jusqu'à 3.000 kilog. de poudre. Il serait difficile et long de donner ici la description de ces appareils; disons seulement qu'il en existe de deux sortes : les uns sont fixes, installés à demeure dans les ateliers de préparation; ils y chauffent la poudre qui

est ensuite voiturée à pied d'œuvre au moyen de tombereaux spéciaux ; les autres, de moindres dimensions, sont mobiles, montés sur roues et peuvent être transportés par chemin de fer dans les villes où le peu d'importance des travaux ne justifie pas l'établissement d'un outillage fixe. Les deux sortes d'appareils sont d'ailleurs du même système qui paraît être jusqu'à présent le plus propre à chauffer la poudre d'asphalte d'une manière méthodique et uniforme. On emploie encore à ce chauffage dans quelques petits ateliers le *décrépitoir* (voir notre premier mémoire), mais ce procédé doit être autant que possible écarté, car il est très-difficile que la poudre y soit chauffée également dans toutes ses parties ; le plus souvent les grains qui séjournent trop sur la tôle sont brûlés tandis que d'autres restent seulement tièdes. Les grands appareils rotatifs peuvent chauffer 1.500 kilog. de poudre par trois quarts d'heure ; les petits, moitié environ ; la température n'y doit pas dépasser 130°, pour les poudres très-riches et 110° à 120° pour celles de moyenne richesse bitumineuse. Certains asphaltes peuvent en effet et même doivent être portés à une température plus élevée que d'autres ; ainsi l'asphalte du Val de Travers, plus chargé en bitume peut atteindre 140° sans en être détérioré, tandis que celui de Seyssel ne doit pas dépasser 120°.

Tout en reconnaissant que l'appareil rotatif procure un chauffage plus uniforme, plus méthodique, plus facile à diriger et à régulariser, nous devons toutefois noter qu'ils doit remplir une condition indispensable, celle d'être disposé de façon à laisser une issue facile à la vapeur d'eau et aux huiles essentielles, que la chaleur chasse de l'asphalte. Si ces vapeurs ne s'échappent pas au dehors elles se condensent, retombent à l'état liquide sur la matière et nuisent à sa cohésion après la compression ; quelques applications exécutées dans ces conditions ont été mises hors de service en peu de mois. Il est donc absolu-

ment essentiel que, soit par un évidement intérieur de 'arbre de rotation, soit par tout autre orifice pratiqué dans e but, les vapeurs puissent s'écouler au dehors de l'appa-eil ou même y soient appelées mécaniquement.

La poudre ainsi chauffée est transportée au lieu d'appli-ation dans des tombereaux en fer construits *ad hoc*. L'as-halte étant très-mauvais conducteur de la chaleur perd eu de sa température en route; avec un matériel conve-ablement disposé on peut conduire la poudre chaude à les distances de 8 ou 10 kilomètres sans lui faire perdre lans le trajet plus de deux ou trois degrés.

Les tombereaux peuvent contenir 2.000 kilog., mais 'en portent, à de grandes distances, guèreplus de 1.500 à .600 kilog.

Le béton posé et profilé dans les conditions que nous vons indiquées tout à l'heure de façon à présenter exacte-nent les pentes que devra avoir la chaussée définitive, on rocède au répandage de la poudre.

On n'est pas encore parvenu jusqu'ici a obtenir ce ré-andage par des moyens mécaniques ; ou on a été empê-hé par des difficultés spéciales tirées de la nature même le l'asphalte et qu'il serait trop long d'expliquer ici. On e borne, encore actuellement, à verser la poudre avec la rouette; un ouvrier, qui doit être très-exercé, l'étend avec e rateau de façon à lui donner une épaisseur uniforme et l'un tiers environ plus grande que celle que doit avoir 'asphalte une fois comprimé, c'est-à-dire 0,09, si la couche omprimée doit être 0,06. Non-seulement l'ouvrier doit eiller à l'uniformité de cette épaisseur, mais il a aussi à e préoccuper de ratisser la poudre étendue de façon qu'elle it partout le même poids spécifique, sans cela les parties es plus denses (la poudre d'asphalte chaude se tassant très-acilement), après la compression, formeraient des bosses t, les moins denses, des flaches ; c'est ce qui arrive quel-uefois, si l'on n'y prend garde, lorsque l'ouvrier n'a pas

soin de régulariser le poids spécifique de la poudre sur les points où les brouettes ont été versées.

Les ouvriers compresseurs viennent ensuite ; ils compriment méthodiquement la poudre, d'abord avec ménagement puis avec énergie, au moyen de pilons de fonte en forme de disque et qui ont été chauffés pour éviter l'adhérence de la poudre. On a tenté à plusieurs reprises, comme c'était naturel, d'opérer ce pilonnage à la vapeur; on y a renoncé par deux motifs; il fallait faire circuler la machine sur le béton ce qui le dégradait; le pilonnage n'était pas assez régulier; la manœuvre de la machine était délicate; en fin de compte le pilonnage était plus coûteux et moins bien fait. Nous pensons cependant que le problème sera résolu et que le pilonnage à vapeur sera avantageux pour les grandes surfaces. Le pilonnage est immédiatement suivi du *lissage* qui se fait au moyen de sortes de fers à repasser, semblables à ceux dont se servent les tailleurs, chauffés au rouge sombre et avec lesquels on polit la surface en faisant disparaître les petits défauts qui, à la longue, deviendraient le germe de détériorations plus graves. La croûte asphaltique doit présenter après le lissage l'aspect du palissandre verni. On le saupoudre de sable très-fin pour enlever le poli qui pourrait favoriser le glissement des chevaux, on passe ensuite sur la surface un rouleau de 4 à 500 kilog. et de 0,70 à 0,80 de largeur pour achever et régulariser la compression. Trois heures après la chaussée peut être livrée aux voitures.

Entretien de l'asphalte comprimé. — Détériorations. — La chaussée en asphalte comprimé, construite avec de bons matériaux par des ouvriers habiles, avec un matériel perfectionné, sur une assiette solide et sèche, est assurément la chaussée par excellence. Le reproche qui lui a été fait à son origine, de se prêter au glissement des chevaux, est tombé devant les résultats statistiques, qui ont démontré que le glissement sur l'asphalte était moindre et beau-

coup moins dangereux que sur les pavés de porphyre à joint serré. Mais elle n'est pas pour cela exempte de défauts. Ces défauts, nous allons les passer en revue, en indiquant de quelle façon nous pensons qu'il y pourrait être remédié.

Dans son remarquable mémoire sur les *voies asphaltées* de Paris, M. l'inspecteur général des ponts et chaussées Homberg a réduit à deux les reproches qu'il a faits aux chaussées en asphalte comprimé : le premier, c'est la difficulté de les construire et de les réparer par des temps « froids et humides »; le second, c'est l'altération qu'éprouvent les matières bitumineuses « sous l'action des fuites de gaz ». Le second de ces griefs disparaîtra le jour, qui ne saurait tarder, où les tuyaux de conduite seront rejetés dans les égouts. Quant au premier, qui est en effet le plus grave de tous ceux qu'on puisse faire au système, nous devons l'examiner de près.

Nous croyons que M. Homberg a légèrement déplacé la cause du mal en l'attribuant « au temps froid et humide ». Ce n'est point précisément l'humidité du temps qu'il en faut accuser, mais l'humidité du sol. On peut transporter, étendre, pilonner l'asphalte chaud par tous les temps, mais non sur toutes les surfaces, et, nous n'hésitons pas à le déclarer, après nous en être assuré par une expérience qui dépasse aujourd'hui vingt ans, toutes les détériorations de la chaussée en asphalte comprimé (celles faites avec de l'asphalte de bonne qualité, bien entendu) ont pour origine l'humidité du sous-sol.

La plus fréquente et la plus funeste des sources de cette humidité est l'insuffisante siccité du béton. Lorsque l'on construit une chaussée en asphalte dans les rues des grandes villes populeuses, comme Paris, où la circulation est énorme et ne peut être sans inconvénients graves, ni suspendue, ni même étranglée par la suppression temporaire d'une moitié de la largeur des rues, il est rare

que l'interdiction puisse durer plus de quelques jours. Il en résulte que la préparation du sol doit être faite très à la hâte : le pavé enlevé, la terre nivelée, le béton coulé et l'asphalte posé avec une certaine précipitation. Le béton est donc, la plupart du temps, encore frais lorsqu'on y répand la poudre d'asphalte chaude. Cette poudre étant, à ce moment, à une température supérieure à 100 degrés, met en vapeur l'humidité du béton ; cette vapeur, en cherchant à s'échapper, découpe en des milliers de petites fentes verticales l'asphalte qui vient d'être comprimé sur elle et qui se trouve dès lors transformé en une sorte de mosaïque dont tous les fragments (les *macarons*, comme disent les ouvriers) sont isolés les uns des autres par des solutions de continuité, au lieu de former une masse monolithe.

Dans les premières semaines, ou les premiers mois, de la circulation, surtout par les temps de chaleur, les roues des voitures, achevant la compression de l'asphalte, bouchent ces fissures et recollent souvent les fragments entre eux, à leur partie supérieure, mais sur une faible profondeur seulement ; la couche reste découpée à sa partie inférieure. Lorsque l'épaisseur sur laquelle les fragments se sont recollés s'est usée par les frottements de la circulation et que la région où les fissures ont subsisté est atteinte, la croûte asphaltique, n'ayant plus la résistance du monolithe, se dégrade rapidement ; les *macarons*, écrasés, s'en vont en poussière, et la chaussée est détruite jusqu'au béton. Telle est, le plus souvent, l'origine de ces flaches que l'on voit se former, d'abord avec l'aspect d'une simple dépression, puis avec celui d'une grande tache noirâtre et humide, striée de fissures de plus en plus apparentes. Peu à peu la flache s'approfondit, la matière asphaltique est désagrégée et entraînée par la circulation des voitures, les roues s'enfoncent jusqu'au béton, et, si l'on ne se hâte de réparer, le trou va s'élargissant d'une façon indéfinie ; on

est obligé alors de découper une certaine zone d'asphalte sain tout à l'entour et de remplacer la partie détériorée, comme nous l'expliquerons tout à l'heure.

Nous ne parlons ici que des chaussées faites avec de l'asphalte pur, de bonne qualité, provenant de mines dont les produits ont été éprouvés; si l'on y emploie de l'asphalte impropre à ce genre de travail, comme nous en verrons des exemples, les chances de destruction triplent ou quadruplent.

En nous maintenant donc dans l'hypothèse d'une chaussée construite avec de bons matériaux, nous ne voyons que deux moyens de prévenir la formation des *macarons :* le premier, c'est l'adoption du béton bitumineux; le second, c'est l'emploi du béton de ciment.

Le béton bitumineux est cher; en outre, il exige des engins, un outillage et un personnel d'ouvriers spéciaux. On ne saurait donc le présenter que comme un expédient utile, mais dont l'usage doit être restreint à certains cas déterminés où il est d'une précieuse ressource, comme lorsqu'on a à établir une chaussée en asphalte sur un pont métallique dont les trépidations dangereuses pour le béton ordinaire s'amortissent sur l'élasticité relative du béton bitumineux. Le pont d'Elbeuf est dans ce cas : le béton bitumineux est un simple mélange de mastic d'asphalte et de cailloux.

Une bonne et solide fondation de béton de ciment, appliqué comme nous l'avons indiqué il y a quelques pages, est le seul moyen pratique et usuel d'éviter les détériorations par *macarons.* Toutefois, il y a encore lieu de prendre garde que l'humidité ne se glisse pas entre le béton et l'asphalte. Cela peut arriver lorsque, pour les besoins de l'écoulement des eaux, on doit donner à la surface un profil concave; mais cette circonstance est rare. Le plus souvent, l'humidité se glisse entre la bordure et l'asphalte ou sur le pourtour des bouches de gaz et d'égouts. C'est

affaire au constructeur de la chaussée de prendre ses mesures pour éviter la production de ces interstices.

Il arrive quelquefois cependant que les macarons se forment de haut en bas ; lorsque, par suite d'un tassement dans le sol ou d'une désorganisation du béton, l'asphalte gerce à la surface, l'humidité pénètre dans les fentes et produit les mêmes ravages que l'humidité sous-jacente. Mais ces détériorations sont peu fréquentes et toutes locales, elles se réparent facilement.

Réparations de l'asphalte comprimé. — En principe, rien n'est plus simple que ces réparations. Un trou s'étant formé dans la croûte asphaltique, on trace tout autour de ce trou une ligne qui embrasse tout le périmètre défectueux, on entaille l'asphalte suivant cette ligne jusqu'au béton, on enlève la partie malade que l'on remplace par de la poudre neuve, laquelle se pilonne de la même façon que dans le travail de premier établissement. Mais en pratique, cette opération présente de nombreuses difficultés et exige des soins assez minutieux.

D'abord, s'il s'agit de remplacer une portion détériorée par la présence de macarons (c'est le cas le plus ordinaire), on doit suppeimer tout ce qui, dans le pourtour du défaut apparent, est plus ou moins avarié ; puis, comme le béton est toujours lui-même quelque peu atteint, on enlèvera de ce béton tout ce qui paraîtra avoir souffert ; on le nivellera par une application de ciment qu'on laissera bien prendre. Si le béton n'est pas compromis, mais seulement humide, on y coulera une couche de mastic d'asphalte qu'on enlèvera avant qu'elle se soit solidifiée. Le mastic liquide, qui est toujours à une température d'au moins 150° à 160°, évapore l'humidité et assèche rapidement la place. C'est alors seulement que l'on posera la poudre.

Dans les temps de pluie ou simplement d'humidité persistante, il est souvent impossible d'assécher complétement l'assiette de béton. Dans ce cas, il est d'usage de remplacer

provisoirement la partie de comprimé avariée par une couche de coulé d'égale épaisseur. Cette pièce de raccord demeure jusqu'à ce que le retour du beau temps permette de lui substituer la réparation définitive. Ce procédé est souvent insuffisant, surtout dans les rues très-fatiguées où la pièce en asphalte coulé est rapidement broyée par les roues. On préfère le procédé plus sûr qui consiste à couler sur le béton humide une mince couche de mastic et à achever la réparation en asphalte comprimé qui, posé sur cet enduit hydrofuge, tient ordinairement comme lorsqu'il l'est dans les conditions normales.

On ne doit jamais entailler l'asphalte à réparer suivant des lignes courbes, mais suivant des directions rectilignes; la soudure de la couche neuve avec l'ancienne se fait ainsi plus sûrement; les joints curvilignes tiennent rarement plus d'un an ou deux. On évitera également de diriger les lignes droites exactement dans le sens longitudinal de la chaussée, car alors les roues des voitures tendent à faire ouvrir les joints. Enfin il est essentiel de ne raccorder les surfaces neuves qu'avec des parties anciennes parfaitement saines et absolument exemptes de macarons.

La construction des chaussées en asphalte est difficile par le mauvais temps, cela est incontestable; la réparation des flaches, trous et autres défauts l'est plus encore. Cependant, à moins que les détériorations, par leur importance et leur fréquence, prennent le caractère d'un désastre, comme nous l'avons vu à Paris l'hiver dernier, il est toujours aisé de s'installer, soit pour la construction, soit pour les réparations, de façon à tenir les travaux à couvert. Nous ne saurions trop le répéter, le mortel ennemi de l'asphalte comprimé, c'est l'humidité sous-jacente; aussi la première prescription à imposer à un entrepreneur chargé de semblables travaux, nous pourrions dire la seule (la question de provenance de son minerai, bien entendu, réservée), c'est de ne jamais poser sa poudre que sur du béton

sec. On devrait donc toujours l'obliger à tenir ses travaux à l'abri de la pluie et à assécher son béton par des moyens artificiels lorsque ce béton a été mouillé. Assurément c'est l'intérêt de l'entrepreneur d'en agir ainsi, surtout lorsque, comme cela devrait toujours avoir lieu, il est assujetti à une garantie à long terme ; mais tels sont les embarras, que des détériorations multipliées causent à la voirie d'une grande ville, lorsqu'ils prennent certaines proportions, que des mesures préventives prises en vue de les éviter ne sont jamais superflues et, nous le répétons, ces détériorations sont évitables.

Ce que nous avons dit de la réparation des détériorations accidentelles s'applique également aux tranchées de gaz ou d'eau. Seulement dans ce cas on est tenu à plus de précautions encore, car il faut remblayer la tranchée, pilonner le remblai, poser un nouveau béton, attendre que ce béton soit sec, et enfin placer la couche asphaltique comme on met une pièce à une étoffe. Ce genre de réparation est extrêmement délicat, en ce sens que si toutes les précautions nécessaires n'ont pas été prises pour obtenir un sous-sol parfaitement fixe; un tassement de quelques millimètres suffit pour produire à la surface une flache où l'eau séjourne.

Ces flaches sont d'ailleurs fréquentes dans les chaussées en asphalte et on le comprend aisément ; il y a tant de causes qui peuvent altérer la parfaite régularité du profil, la couche asphaltique épousant rigoureusement toutes les ondulations de son assiette, que des cuvettes plus ou moins spacieuses, profondes de 1 à 10 ou 12 millimètres, se produisent très-souvent, où les eaux pluviales séjournent, au grand déplaisir des passants. Pendant longtemps on n'a eu d'autre moyen de les faire disparaître que de découper leur pourtour, d'enlever la croûte asphaltique et de la remplacer par de la poudre neuve, comme s'il s'agissait d'un trou compromettant toute l'épaisseur de la couche

d'asphalte. Nous avons indiqué récemment un remède plus rapide, beaucoup plus économique et qui, mis en pratique l'année dernière, a parfaitement réussi. Il consiste simplement à couvrir la flache d'une tôle chauffée, de 10 à 12 millimètres d'épaisseur, que l'on place à quelques centimètres de hauteur au-dessus du sol ; au bout de quelques minutes, la chaleur de la tôle ramollit l'asphalte sur 1 ou 2 centimètres de profondeur. On racle alors la surface pour en enlever la poussière et mettre à nu l'asphalte pur ; puis on saupoudre de poudre neuve et chaude en quantité suffisante pour combler la dépression et l'on pilonne énergiquement. Les deux poudres se soudent parfaitement et ne se séparent plus. Des réparations de ce genre faites il y a un an, sur nos conseils, aux chaussées asphaltées de Lyon ont fait disparaître des flaches d'une manière complète; on n'en a jamais revu les traces.

Un autre genre de détérioration à redouter lorsqu'on emploie de la poudre trop riche en bitume est la formation des bourrelets. Tout le monde a remarqué que pendant les fortes chaleurs certaines chaussées en asphalte comprimé se ramollissent, se gondolent, se plissent, et qu'en fin de compte il reste à leur surface des espèces de bourrelets de forme irrégulière, qui parfois même refluent sur les canivaux. Il y a quelques années, nous avons vu à Marseille, dans la rue qui longe la préfecture, des bourrelets semblables s'appuyer sur la bordure et en dépasser le niveau. La production de ces accidents est favorisée par l'instabilité du sol, par une pulvérisation incomplète ou par un chauffage insuffisant de la poudre, par un étendage défectueux, enfin par un pilonnage trop peu énergique. Très-souvent les roues des voitures détruisent ces bourrelets, mais pour les laisser se reformer plus loin. Il n'y a d'autre remède que de relever l'asphalte, le pulvériser et le chauffer à nouveau pour l'amaigrir un peu, puis le remettre en place. Mais on évitera de tels embarras si

l'on a soin de n'employer à la construction des chaussées que des roches asphaltiques, dont la teneur en bitume ne dépasse pas 10 p. 100, et surtout qui ne contiennent pas de principes huileux mélangés à leur bitume, ou bien en mélangeant les minerais trop riches avec des minerais plus pauvres, mais *provenant des mêmes gisements*. Il a été établi par des expériences nombreuses, que très-souvent des poudres provenant de gisements différents, ne supportent pas les mêmes températures pour être chauffées et comprimées. On pourrait probablement tourner la difficulté en chauffant chaque poudre séparément à la température qui lui convient et en les mélangeant ensuite ; mais c'est une complication à éviter autant que possible.

Trottoirs en asphalte comprimé. — Il y a une quinzaine d'années un essai de trottoir en asphalte comprimé fut tenté dans la grande halle du chemin de fer du Nord. C'était une hardiesse. L'asphalte comprimé qui n'obtient le complément de sa compression que par le roulage des voitures, ne paraissant pas indiqué pour résister à une fatigue de frottement et d'usure commne la subissent des trottoirs. Le trottoir de la gare du Nord avait 0,03 d'épaisseur ; il était soumis à un roulage fréquent des chariots à bagage, c'était en quelque sorte une fatigue mixte ; il tint parfaitement. Depuis, une grande quantité de trottoirs de ce genre ont été construits dans les rues de Paris, de Lyon, etc., et ont donné les meilleurs résultats. Le trottoir en asphalte comprimé est plus doux au pied et plus agréable à l'œil que celui en asphalte coulé ; nous le croyons plus cher ; c'est un trottoir de luxe et par là même désigné pour les quartiers opulents des capitales.

Pavés en asphalte comprimé. — L'outillage de construction et de réparation des chaussées en asphalte est compliqué, dispendieux, d'un transport difficile, il doit être manœuvré par des ouvriers spéciaux ; en sorte que, hors des villes de quelque importance l'usage du système pré-

sente des difficultés sérieuses. Pour obvier dans une certaine mesure à ce grave inconvénient, nous avons conseillé l'emploi de pavés ou carreaux, en asphalte comprimés à l'avance, soit à chaud, soit même à froid, et qui, juxtaposés, reproduisent, aux joints près, la croûte asphaltique ordinaire. A la suite d'une série d'expériences, entreprises dans ce but, nous sommes arrivé à produire, sous une pression de 200 kilog. par centimètre carré, des carreaux d'un décimètre carré et de 0,04, 0,05 et 0,06 d'épaisseur. Nous en avons fait de semblables avec toutes les roches d'asphaltes connues. Sur notre conseil la Compagnie Générale des asphaltes de France, en a fait l'application sur plusieurs points avec plein succès. Nous ne conseillerions pas l'adoption de ce système (*), pour les voies très-fréquentées, mais dans les rues de circulation ordinaire, dans les cours, dans les passages des portes cochères, il peut rendre de grands services ; un échantillon existe depuis plusieurs années dans le passage d'entrée du plus important magasin de machines agricoles de Paris, celui de M. Pilter, rue Alibert ; malgré une circulation considérable de grosses charges, cet échantillon est encore en parfait état.

Avantages de l'asphalte comprimé. — L'expérience de l'asphalte comprimé appliqué aux chaussées est aujourd'hui faite. Il a montré ses défauts et ses avantages ; nous n'hésitons pas à dire que ses avantages l'emportent de beaucoup sur ses défauts. Nous ne parlerons ni de son insonorité (qu'on a rangée à tort parmi ses vices ; si l'on n'entend pas venir les voitures, on entend parfaitement le bruit des pieds des chevaux qui suffit pour avertir les piétons), ni de sa précieuse propriété de ne produire ni boue, ni poussière, ni de son aspect agréable à l'œil qui

(*) Nous croyons devoir ajouter que ce procédé, ainsi que tous ceux, d'ailleurs, qui sont l'œuvre de l'auteur de cette notice, ont été laissés par lui dans le domaine public.

n'est pas une qualité négligeable dans l'ensemble des embellissements d'une ville; nous en avons fait ressortir l'importance dans notre premier mémoire. Nous insisterons seulement sur un point que nous avions insuffisamment développé, son action sur l'hygiène publique.

La couche asphaltique étendue sur le sol, comme une couche de caoutchouc, intercepte absolument toute relation entre les parties inférieures du sol et l'air atmosphérique, elle ne se laisse point pénétrer par les eaux pluviales, qui s'en vont forcément et en totalité dans les égouts, et, grâce à son caractère absolument hydrofuge, la chaussée sèche dès que la pluie a cessé. Le pavé au contraire, le pavé de grès par sa porosité et ses joints, le pavé de pierre dure, par ses joints seulement, ménagent une communication constante entre les deux régions. Toutes les impuretés de la surface dissoutes par l'humidité extérieure sont, par elle aussi, véhiculées dans le sous-sol; puis, lorsque le soleil frappe, ces eaux viciées sont évaporées en partie et rapportent dans l'air les miasmes élaborés au-dessous; c'est un mal depuis longtemps reconnu et incontesté, mais contre lequel on ne connaissait pas de remède. Le système consistant à jointoyer les pavés de porphyre avec du mastic d'asphalte eut pu peut-être le combattre, mais il est fort coûteux et rend la chaussée extrêmement dure aux voitures. L'asphalte comprimé semble avoir résolu le problème et nous serions porté à penser que, de tous les services qu'il peut rendre, celui-ci est le plus efficace et le plus précieux. Assurément l'influence des miasmes délétères rayonnés à travers les divers systèmes de pavages à joints ouverts, ne peut se doser d'une manière précise; elle s'apprécie plutôt par induction que par une observation directe et facile à mettre en chiffres, mais elle n'en est pas moins évidente et moins redoutable. Nous citerons à l'appui de notre opinion celle de l'inspecteur sanitaire de New-York, le docteur Raymond qui, dans

un rapport lu à la Société d'hygiène publique des États-Unis, attribue formellement aux miasmes émanés du pavé en bois, les ravages de la dernière fièvre jaune de la Nouvelle-Orléans, qui en quelques semaines a emporté douze mille habitants (*).

Nous serons sobre de développements sur ce sujet, notre but étant surtout de traiter la question au point de vue purement technique ; nous croyons néanmoins devoir appuyer sur cette affirmation, que, si les avantages de la chaussée en asphalte comprimé sont désormais établis et classés, ses vices sont pour la plupart curables, et l'on doit se garder de fonder une opinion sur la façon dont il s'est comporté dans ces derniers mois à Paris; nous allons expliquer pourquoi.

Des détériorations exceptionnelles constatées sur les chaussées de Paris pendant l'hiver de 1878-1879. — Il est malaisé de traiter ici une semblable question sans effleurer des intérêts privés que nous nous faisons une loi impérieuse de respecter. Nous nous efforcerons de nous maintenir, autant que possible, dans les limites de l'observation impersonnelle et de l'étude purement technique; mais il n'est pas possible de passer sous silence un fait dont les ingénieurs d'abord, le public ensuite, se sont préoccupés très-vivement : nous voulons parler d'une sorte de détérioration subite et générale survenue dans ces derniers mois aux chaussées en asphalte de Paris. Il est essentiel d'en examiner la nature et les circonstances et de reconnaître si leurs causes tiennent au système lui-même, aux matériaux qu'il a employés, ou à la manière de le mettre en œuvre.

Toutes les chaussées comprimées construites à Paris jusqu'au 31 décembre 1877 l'ont été en asphalte de deux provenances : le Val de Travers et Seyssel. Sauf les accidents

(*) *New-York Times*, 12 décembre 1878.

causés par la pose prématurée de la poudre sur bétons frais ou insuffisamment solides, accidents sur le compte desquels nous nous sommes expliqué tout à l'heure, ces deux matériaux ont donné de bons résultats, et l'on peut dire qu'ils ont largement contribué à l'embellissement des quartiers du centre de la capitale. Ces deux mines ne sont pas les seules dont les produits aient servi à la construction des chaussées : en Allemagne, en Autriche, on a employé la roche de Limmer (Hanovre) ; à Strasbourg, celle de Lobsann (Alsace) ; à Londres, tous les minerais d'Europe ont été essayés, entre autres celui de Raguse (Sicile). Ces expériences ont eu des fortunes diverses ; nous n'avons pas à distribuer ici des numéros d'ordre de mérite : nous constatons seulement qu'à Paris le minerai de Seyssel et celui du val de Travers avaient été seuls employés, lorsqu'à la suite d'une adjudication nouvelle des travaux de la Ville un troisième produit fut introduit dans la construction des chaussées.

Nous avons lieu de penser que ce produit était un mélange de roche de Lobsann avec une autre espèce d'asphalte extrêmement maigre destiné à contrebalancer l'excès de bitume contenu dans le minerai de Lobsann, lequel en contient jusqu'à 11 p. 100.

Est-ce l'effet du mélange de poudres différentes ? est-ce la nature propre du minerai de Lobsann, de grain un peu sablonneux et d'apparence légèrement spongieuse ? Nous ne saurions le dire ; ce qui est certain, c'est que de graves détériorations n'ont pas tardé à survenir et à prendre des proportions inquiétantes. Ne pouvant naturellement faire la part des responsabilités, le public a attribué ce désastre aux imperfections du système lui-même, et nous devons dire que plus d'un ingénieur éminent a partagé cette opinion.

D'après les quelques pages qui précèdent, on a pu voir que trois causes peuvent amener la destruction des chaus-

sées en asphalte : l'emploi d'une roche défectueuse, la pose de la poudre chaude sur un sol humide ou instable, l'inhabileté des ouvriers chargés de la préparation de la matière et de l'exécution des travaux. Une seule de ces causes suffit pour vicier une application et la condamner à une mort prochaine; si, au contraire, ces trois conditions nécessaires sont remplies, on peut compter d'une façon assurée et formelle que le travail tiendra et ne sera détruit que par l'usure obligée, usure qui, dans les conditions de circulation moyenne des grandes villes, n'atteint pas 2 millimèt. par an.

Il n'y a donc pas lieu de considérer son récent échec à Paris comme devant être imputé à la nature même du moins imparfait de systèmes de chaussées que nous ayons eu encore. Loin de nous décourager, cet échec ne doit avoir d'autre résultat que d'attirer davantage encore, sur les perfectionnements à apporter au procédé, la profonde attention des hommes de l'art. Si nous étions très-riches en systèmes de chaussées, nous pourrions traiter légèrement celui-ci; mais, avoir à choisir seulement entre l'antique pavé et le moderne macadam n'est pas une alternative propre à nous rendre trop difficiles. Nous ne croyons donc pas qu'il faille tirer des récentes mésaventures de l'asphalte comprimé d'autre conséquence que celle-ci : c'est qu'il faut redoubler de surveillance pour obtenir que rien n'y soit négligé, soit dans la provenance des matériaux, soit dans la manière de les employer. A ce prix seulement, et sous cette surveillance indispensable, l'asphalte pourra donner ce qu'on doit attendre de lui. Nous reviendrons, dans les dernières pages de ce travail, sur ce qui concerne la pratique de cette surveillance.

II. — Applications du mastic d'asphalte.

Trottoirs. — Nous avons donné, dans notre Mémoire de 1861, des indications assez détaillées sur la construction

des trottoirs en asphalte pour n'avoir pas besoin d'y revenir ici. D'ailleurs la pratique de ce genre de travail est aujourd'hui tellement connue que les ingénieurs et les hommes spéciaux sont maintenant parfaitement édifiés à son sujet. Il a du reste fait peu de progrès depuis vingt ans; les procédés sont sensiblement les mêmes et les seules règles essentielles à suivre, pour celui qui fait exécuter de semblables travaux, sont de n'employer que des mastics dont la provenance est connue et de les faire appliquer par des ouvriers expérimentés; la pratique, le *tour de main* nécessaires pour faire un bon ouvrage se communiquent d'ouvrier à ouvrier, par une sorte de transmission manuelle; un traité didactique sur ce sujet serait incompréhensible et, dans tous les cas, insuffisant.

Dans les grandes villes où l'activité de la circulation empêche qu'on installe au milieu des rues les chaudières à application, les administrations prescrivent la préparation du mastic dans des chantiers relégués ordinairement aux quartiers excentriques. Le mastic est ensuite chargé chaud et tout sablé dans des chaudières montées sur roues, munies de leur foyer et de leur cheminée, et qu'un cheval conduit au lieu d'emploi. Le chargement ordinaire d'une chaudière locomobile est 1.000 kilog. de mastic prêt à être coulé. Le transport du mastic chaud par locomobiles est une grande amélioration; il permet d'exécuter dans les grandes villes d'immenses travaux d'asphaltage sans aucune entrave pour la circulation; aussi le système tend-il à se répandre même dans les villes de second ordre. Un agitateur intérieur est installé dans chaque chaudière pour empêcher le sable de se précipiter au fond et le mastic de se brûler au contact des surfaces de chauffe; le charretier donne seulement de temps en temps quelques tours de manivelle afin de mettre en mouvement cet agitateur. Plusieurs tentatives ont été faites en vue de donner au mécanisme une marche automatique. On a essayé de le faire mouvoir au

ıoyen d'une chaîne Galle, actionnée par l'essieu des roues; mécanisme fonctionnait très-bien, mais n'a pu résister à la rutalité des conducteurs qui le brisaient à tout moment. n autre système, plus ingénieux que pratique, et que nous vons vu figurer à l'Exposition de 1878, consiste à placer ır la locomobile une petite machine à vapeur dont l'eau st chauffée par la chaleur perdue du mastic en fusion; rsque la locomobile est au repos, on la conjugue avec lusieurs autres non pourvues de machine et elle fait mouɔir les agitateurs de tout le groupe; lorsqu'elle est en arche, son moteur actionne seulement son propre agitaur. C'est une conception un peu enfantine à laquelle il rait difficile d'assigner une place dans un matériel sérieux. ısqu'à présent, le système primitif de locomobile a génélement prévalu.

Chapes de voûtes. — L'emploi du mastic d'asphalte aux ıapes des voûtes et des ouvrages de fortifications a pris ıe grande extension. Il est en effet excellent pour prérver les maçonneries contre l'infiltration des eaux pluales. Un ancien officier du génie, M. P. Coignet, a publié 1875 une très-intéressante brochure (*) sur la meilleure anière de construire ces chapes. Il a, dit-il, fait exécuter 1853, au fort de Vincennes, de revêtements des voûtes casemates en mastic de Seyssel, à 0m,01 d'épaisseur sur ıe couche de mortier de 0m,05. Ces revêtements ont été sités en 1875 par le moyen de sondages dirigés au hard et qui ont établi les faits suivants :

Les chapes étaient toujours exactement imperméables;

Les casemates n'offraient pas la moindre trace d'humité;

Le mastic, dosé au sulfure de carbone, a donné 15,15 100 de bitume, soit exactement la proportion initiale.

(*) *Note sur les chapes de voûtes en mastic bitumineux de yssel*, par M. P. Coignet, ancien officier du génie. Gauthierllars, 1875.

Les chapes avaient donc résisté pendant vingt-deux ans et se trouvaient encore, au bout de ce temps, dans le même état de conservation que le jour de leur établissement.

Nous devons dire toutefois que pour donner de tels résultats, les chapes en asphalte ne doivent être confiées qu'à d'excellents ouvriers et être faites qu'avec du mastic très-pur et très-bien cuit. On conçoit que des ouvrages destinés à être emprisonnés entre deux maçonneries, ou sous une couche de terre d'une épaisseur considérable, placés par conséquent hors de toute surveillance possible et dans une position très-difficile à atteindre pour les réparations, doivent être exécutés avec un soin tout à fait spécial.

Planchers asphaltés, préservatifs contre l'incendie. — Une des plus curieuses propriétés de l'asphalte est celle qui en fait un puissant isolateur d'incendie.

Il y a une douzaine d'années, un incendie se déclara sous nos yeux au rez-de-chaussée d'une grande usine ; le feu était tellement violent qu'avant que les secours eussent été organisés, la flamme avait embrasé la poutraison du plancher supérieur qui ne tarda pas à s'effondrer. Il était à craindre que, cet obstacle disparu, le feu se communiquât à la charpente en bois de l'établissement qui, tout imprégnée de vapeurs bitumineuses, eût flambé comme une allumette ; heureusement, le plancher effondré était recouvert d'une couche de mastic d'asphalte de 10 à 12 millimètres d'épaisseur. Cette couche, ramollie par la chaleur, avait pris la consistance d'une étoffe épaisse et incombustible qui, en tombant sur le foyer d'incendie, l'enveloppa dans ses plis et l'étouffa net.

Nous signalâmes ce fait singulier à M. Eugène Flachat, alors ingénieur-conseil de la Compagnie des omnibus, et qui s'occupait de construire les immenses magasins à fourrage de cette compagnie. M. Noisette, ingénieur des ateliers, avait aussi constaté le fait à l'occasion de plusieurs commencements d'incendie survenus dans des écuries au-

dessus desquelles on avait établi un plancher asphalté en vue d'empêcher la buée de transpiration des chevaux de pénétrer dans les étages supérieurs. M. Flachat répéta l'expérience en petit, en présence des officiers du corps des pompiers de Paris et, à la suite de ces expériences, qui confirmèrent complétement notre observation, décida d'asphalter les planchers de tous les étages des magasins des omnibus. Cet exemple a été suivi depuis par beaucoup d'établissements exposés aux mêmes dangers et qui s'en sont très-bien trouvés. Nous ne saurions trop conseiller l'adoption de ce système qui, judicieusement employé, peut prévenir de redoutables désastres.

Plusieurs journaux des départements n'en ont pas moins publié très-sérieusement en 1871, que pendant le siége de Paris, les habitants, dépourvus de combustible, avaient brûlé pour se chauffer le bitume de leurs trottoirs !

Skating-rinks. — On a imaginé de remplacer dans les skating-rings la glace par une aire en asphalte très-dure et très-unie. On en a construit dans plusieurs des grandes villes de France, où le goût du patinage s'est répandu subitement avec une telle intensité que dans plusieurs établissements il a fallu travailler jour et nuit pour livrer plus promptement les salles des *skatings*. La composition employée pour ce genre de dallage est la suivante :

Mastic d'asphalte naturel.	81	100
Bitume épuré.	4	
Silex broyé très-fin.	15	

Cette matière résiste remarquablement bien à l'action du patin à roulette; tous les jours on lubrifie la surface avec une très-légère application d'huile qui la rend douce et glissante sans lui enlever rien de sa solidité.

Dalles en asphalte. — Les mêmes raisons qui ont conduit à fabriquer des carreaux en asphalte comprimée avaient déjà donné à M. Chabrier l'ingénieuse idée de fa-

briquer des dalles en mastic d'asphalte, que l'on puisse faire poser n'importe où et par le premier maçon venu, là où il serait trop coûteux d'envoyer un matériel d'application et des ouvriers spéciaux. Ces dalles, carrées, de un quart de mètre de surface, sont purement et simplement des fragments de trottoirs préparés à l'avance pour être expédiés au loin et que l'on pose comme un carrelage ordinaire, après les avoir préalablement chauffés légèrement afin de les ramollir et de leur permettre d'épouser très-exactement les ondulations du sol sur lequel on les place; ce réchauffage s'opère en plongeant les dalles dans une bassine d'eau bouillante. Les dalles étant mises en place et juxtaposées, on les soude au moyen d'un mastic bitumineux pur et un peu plus fusible que le mastic ordinaire; elles ne forment alors qu'une seule pièce qui remplace complétement le dallage ordinaire. Des dalles striées sont préparées spécialement pour les étables et les écuries. L'usage de ce genre de dallage commence à se répandre dans les campagnes où il est appelé à rendre de sérieux services, surtout au point de vue de l'hygiène.

Pavés en mastic d'asphalte.— Un grand nombre de tentatives ont été faites pour remplacer le pavé ordinaire par des pavés artificiels en mastic d'asphalte. Aucun n'est jusqu'ici parvenu à prendre sa place dans la pratique des travaux publics. Tout récemment M. Gobin, ingénieur en chef des ponts et chaussées a proposé un nouveau système composé, croyons-nous, de mastic d'asphalte uni à du mâchefer qui donne à son pavé une dureté remarquable. Ce système est actuellement à l'essai; il est impossible de se prononcer encore d'une façon catégorique sur sa valeur. En thèse générale, nous ne pensons pas que les pavés artificiels quels qu'ils soient, bitumineux ou autres, puissent remplacer avec avantage les pavés de grès ou de porphyre; ils en ont les inconvénients sans en présenter les avantages; toutefois, il ne faut pas à notre avis les condamner

d'une façon absolue, car il peut se présenter tels cas de disettes de pavés où les produits dont nous parlons pourraient être appelés à les suppléer. Il serait donc à souhaiter qu'un procédé sérieux fût expérimenté et réussit, c'est à ce point de vue que le système de M. Gobin doit être étudié.

Fondations de machines en mastic d'asphalte.—Une des plus intéressantes applications du mastic d'asphalte, est la construction des fondations en maçonnerie hourdée en asphalte ou en bétons bitumineux, ainsi que leur emploi aux fondations de machines de toutes sortes. L'origine du système est celle-ci.

En 1862, l'auteur de cette notice, ayant à installer une machine à vapeur horizontale de 50 chevaux et manquant de matériaux appropriés pour sa fondation, eut l'idée de placer cette machine sur un massif en asphalte. Le bâtis avait 7 mètres de long sur 1 mètre de large ; un monolithe de cette dimension était difficile à trouver, l'étude que nous avions faite de l'asphalte depuis plusieurs années, nous avait révélé chez lui des propriétés peu connues et dont nous résolûmes d'essayer de tirer parti. Ces propriétés étaient une ténacité extraordinaire, une résistance complète à la déformation dans toute masse asphaltique dépassant un certain volume (par exemple dans un bloc de 3 ou 4 décimètres cubes), et cela par n'importe quelle température atmosphérique ; enfin, malgré cette ténacité et cette insensibilité, une légère élasticité très-précieuse en ce qu'elle absorbe les trépidations comme nous l'expliquerons tout à l'heure.

Le monolithe fut coulé dans un moule en planches ; la matière était simplement composée de gros moellons calcaires préalablement chauffés et noyés dans une sorte de béton bitumineux formé de 40 p. 100 de cailloux et de 60 p. 100 de mastic d'asphalte. On disposait un lit de ces moellons à joints larges et très-irréguliers, on y coulait du béton liquide, on plaçait un second lit de pierres et ainsi

de suite. On avait réservé au moyen de noyaux en fer-blanc rempli de terre glaise, l'emplacement des boulons de fondation ; en outre on avait noyé dans la masse un cadre en bois de chêne sur lequel devait reposer le bâtis en fonte de la machine. L'opération eut un plein succès, l'appareil installé ainsi fonctionne depuis quinze ans jour et nuit, sans s'être dérangé un seul jour et sans que sa fondation ait tassé d'un millimètre.

La réussite de cette importante expérience nous a conduit à fonder de la même façon diverses machines à grande vitesse telles que des broyeurs Carr, qui exigent une grande précision de montage et, par conséquent, une assise absolument invariable. Un de ces broyeurs a été installé par nous sur un bloc d'asphalte évidé, d'une hauteur de 4 mètres au-dessus du sol, et marche ainsi depuis cinq ans sans qu'on ait eu à constater, au niveau à bulle d'air, la plus légère dénivellation dans ses paliers.

Depuis, ces applications ont été multipliées. M. Delano, directeur de la Compagnie Générale des asphaltes de France, a fondé de la même façon, et avec le même succès, le broyeur Toufflin, à moudre le blé, qui figurait à l'Exposition et marchait à 1.200 tours à la minute, ainsi que des marteaux-pilons, des machines à frapper les médailles et d'autres appareils analogues. M. le capitaine d'artillerie Naquet a appliqué le même système à la fondation d'un marteau-pilon à grande vitesse établi dans les ateliers du fort de Vincennes et destiné à travailler des pièces de chassepot.

Nous nous sommes arrêté sur ce système de fondations avec quelques détails, parce que nous le croyons destiné à prendre dans l'avenir une grande extension partout où l'on aura besoin de monolithes artificiels réunissant une extrême ténacité à une élasticité relative, c'est-à-dire propre à éteindre les vibrations des machines, tout en assurant à leurs organes une invariabilité absolue. Ces qualités nous

ont paru devoir être signalées ici avec d'autant plus d'opportunité qu'on ne se serait certes pas attendu à les rencontrer dans l'asphalte.

CONCLUSIONS.

Il y a plusieurs conclusions pratiques à tirer des faits qui font l'objet de cette notice.

D'abord, ils montrent que, malgré les services incontestés qu'il a rendus, depuis un quart de siècle déjà, aux travaux publics et spécialement à la voirie des villes, l'asphalte est encore, en dehors des grands centres, sinon tenu en suspicion, du moins accueilli avec une certaine défiance par les ingénieurs de l'État et les ingénieurs militaires. Cette défiance n'a rien qui doive surprendre : l'industrie de l'asphalte a dans son dossier des faits de spéculation effrontée qui, pour remonter à plus de quarante ans, n'en pèsent pas moins lourdement sur son passé; il porte la peine des agiotages célèbres dont il a été l'innocent prétexte et des ruines financières que la faveur extravagante dont il a joui un moment a causées. En outre, les falsifications sans nombre qui se sont développées à son ombre et sous son nom, la difficulté où l'on a été longtemps de discerner le vrai du faux, ont laissé à tous ceux qui s'en sont occupés une incertitude qui n'est pas encore dissipée aujourd'hui. Il en est résulté, chez quelques ingénieurs, une sorte d'éloignement pour ce produit suspect. Ce sont ces motifs, sans doute, qui l'ont empêché de prendre jusqu'ici la place qui lui est due à côté des chaux, des ciments, des pierres de construction, des pavés, en un mot des matériaux utiles dont l'étude a été faite d'une façon absolument complète par les ingénieurs les plus savants et les plus distingués.

Nous devons reconnaître qu'une réaction non équivoque

a commencé en sa faveur depuis quelques années. S'il est toujours discuté, si son étude officielle n'a pas encore été sérieusement faite, on commence du moins à y voir clair dans l'obscurité et la confusion où l'ont maintenu longtemps les circonstances fâcheuses au milieu desquelles il est apparu et les falsifications qui n'ont pas cessé de le compromettre. Il est à souhaiter que cette lumière achève de se faire.

Car, si, dans les grandes villes, les ingénieurs se sont beaucoup préoccupés de son application, bien peu ont eu occasion de le voir dans ses gisements et dans ses usines de préparation. Il arrive, sans qu'on sache d'où, si non par ouï dire; les cahiers des charges portent que son lieu de provenance doit être indiqué sur les lettres de voiture; cette précaution prise et la marque de fabrique prescrite, on se croit à l'abri de toute sophistication, et garanti contre tout mécompte.

Nous ne pensons pas que de telles précautions suffisent pour faire progresser l'asphalte comme l'exigent les besoins croissants de bien-être et d'embellissement des villes. On ne doit pas laisser à ceux qui l'exploitent, et qui trop souvent sont eux-mêmes inhabiles à l'utiliser méthodiquement et scientifiquement, le soin d'en divulguer la nature. Il est nécessaire que les ingénieurs de l'État, c'est-à-dire ceux qui sont le plus directement intéressés à le connaître aillent le trouver dans ses centres de production et l'y étudient dans ses origines comme dans ses transformations.

Parmi les avantages que procurerait une telle étude faite dans de pareilles conditions, il en est un, absolument essentiel, qui serait de mettre la rédaction des cahiers des charges spéciaux à l'abri d'incertitudes fâcheuses. La plupart des cahiers des charges de travaux d'asphalte, au milieu d'un luxe extrême de prescriptions et d'interdictions, présentent souvent des erreurs dont, ni les ingénieurs ou architectes qui les ont dressés, ni les entrepreneurs, dont ils sont la

loi, ne peuvent s'expliquer la présence; ces erreurs sont venues là on ne sait d'où, on ne sait comment; sans doute parce qu'on a mal copié ou modifié inconsidérément un autre cahier des charges. Nous pourrions citer des exemples, faciles à vérifier, de clauses prescrivant, comme lieu d'origine, des gisements d'asphalte qui n'existent pas, ou bien qui en énumèrent plusieurs dont trois au moins sont les noms différents d'une même mine; on y impose d'une manière générale pour le chauffage de la poudre destinée au comprimé des degrés de température auxquels tel asphalte brûlera sûrement, ou encore on y ordonne des proportions de matières impraticables. Nous pourrions aller loin dans ces citations; mais ce travail n'est pas une œuvre de critique; nous avons voulu seulement montrer l'intérêt qu'il y aurait, pour l'État et pour les administrations publiques, à pénétrer plus profondément par le moyen de leurs agents compétents, dans les circonstances dont se compose la production et l'élaboration de l'asphalte. Si nous devions être écouté de ceux qui sont qualifiés pour prendre une semblable mesure, nous exprimerions le vœu, qui sera la conclusion dernière de cette note, qu'un ingénieur de l'État fut chargé de visiter tous les gisements d'asphalte connus et fît un rapport détaillé et officiel sur la nature et l'importance de leur production, sur leur richesse bitumineuse, sur leurs moyens d'action, sur le degré de confiance que peuvent inspirer leurs exploitants, sur les procédés de fabrication employés dans les usines où l'on prépare le mastic et sur la valeur de leur marque, enfin sur tout ce qu'il est nécessaire de connaître pour que chaque intéressé sache où l'on peut aller chercher l'asphalte et où il faut éviter de l'aller prendre. Le corollaire d'une pareille étude serait la confection d'un cahier des charges type, qui servirait de modèle pour les pièces de cette nature et qui permettrait d'éviter à coup sûr les erreurs que nous avons signalées plus haut. Ce que l'auteur de ce mémoire a ait

d'une façon privée, dans un but simplement scientifique et technique, doit être fait maintenant d'une manière authentique avec les garanties et l'autorité qui s'attachent à une mission officielle. Au point où en est arrivée l'industrie de l'asphalte, cette consécration lui paraît due.

Mai 1879.

ANNEXES.

PIÈCE A.

Dosage du bitume pur contenu dans le bitume de Trinidad brut.

Dosages effectués sur diverses cargaisons de navires arrivés de l'île de Trinidad. — (Préalablement à chaque opération, le brut a été purgé de son eau, qui a été trouvée dans la proportion de 32 à 38 p. 100 du poids total de la matière. C'est donc sur du minerai complétement sec que les analyses ont eu lieu.)

DATES des arrivages de Trinidad.	POIDS de bitume pur.	POIDS de l'argile.	POIDS total.
19 novembre 1866	53,34	46,66	100,00
	46,28	53,72	100,00
6 septembre 1867	45,00	55,00	100,00
16 novembre 1867	53,30	47,70	100,00
10 avril 1868	54,52	45,48	100,00
12 mai 1868	54,14	45,86	100,00
12 décembre 1877	49,25	50,75	100,00
	51,00	49,00	100,00
18 avril 1878	57,55	42,65	100,00

PIÈCE B.

Analyses faites sur différents échantillons d'asphalte par le laboratoire des ponts et chaussées.

ÉCOLE DES PONTS ET CHAUSSÉES.

LABORATOIRE.

Extrait du registre des essais.

N° 1. — Asphalte du Val-de-Travers.

Eau perdue à l'étuve à 90°	0,50
Produits solubles dans le sulfure de carbone (bitume)	10,10
Matières minérales insolubles dans les acides	0,45
Alumine et peroxide de fer	0,25
Carbonate de chaux	87,95
Carbonate de magnésie	0,30
Produits non dosés et pertes	0,45
Total	100,00

N° 2. — Asphalte de Lobsann.

Eau et matières volatiles à 100°	3,40
Matières solubles dans le sulfure de carbone (bitume)	11,90
Sable	3,05
Soufre	5,00
Fer combiné au soufre	4,45
Alumine et peroxide de fer	1,25
Carbonate de chaux	69,00
Carbonate de magnésie	0,30
Produits non dosés et perte	1,65
Total	100,00

N° 3. — Asphalte de Maestu (Espagne).

Eau et matières volatiles à 100°	0,40
Matières solubles dans le sulfure de carbone (bitume)	8,80
Sable siliceux	57,40
Silice fine ou combinée	11,35
Alumine	3,35
Peroxide de fer	1,00
Carbonate de chaux	9,15
Carbonate de magnésie	8,10
Produits non dosés et pertes	0,40
Total	100,00

N° 4. — **Asphalte de Sicile.**

Eau et matières volatiles à 100°	0,80
Matières solubles dans le sulfure de carbone (bitume)	8,85
Sable	0,60
Peroxide de fer et alumine	0,90
Carbonate de chaux	87,50
Carbonate de magnésie	0,95
Produits non dosés et perte	0,40
Total	100,00

N° 5. — **Asphalte de Seyssel (Pyrimont).**

Eau perdue à l'étuve à 90°	1,90
Produits solubles dans le sulfure de carbone (bitume)	8,00
Matières minérales insolubles dans les acides	0,10
Alumine et peroxide de fer	0,15
Carbonate de chaux	89,55
Carbonate de magnésie	0,10
Produits non dosés et perte	0,20
Total	100,00

N° 6. — **Asphalte de Forens (Ain).**

Perte par dessiccation	0,25
Matières solubles dans le sulfure de carbone (bitume)	2,25
Résidu insoluble dans les acides	0,05
Alumine et peroxide de fer	0,15
Carbonate de chaux	97,00
Carbonate de magnésie	0,20
Produits non dosés et pertes	0,10
Total	100,00

OBSERVATIONS.

Échantillon N° 2. — Asphalte de Lobsann.

Cet échantillon ne renferme pas de quantités sensibles d'argile, comme on l'avait présumé ; mais on y trouve environ 9 $^1/_2$ p. 100 des pyrites ou bisulfure de fer. Les pyrites peuvent devenir la cause d'insuccès dans l'emploi de cette matière. Par le chauffage auquel est soumis le bitume, elles peuvent perdre la moitié de leur soufre et se transformer en protosulfure de fer, matière oxidable, qui par l'exposition à l'air se transforme en un sel soluble de sulfate de fer. Il peut en résulter une désagrégation quelque temps après la mise en place.

Échantillon N° 3. — Asphalte de Maestu.

On n'a trouvé que des traces de soufre dans cet échantillon, qui n'est pas, à proprement parler, un asphalte : c'est une roche sili-

ceuse légèrement argileuse imprégnée de bitume. Elle ne contient pas de pyrites et serait à l'abri des accidents signalés ci-dessus. Le échantillons nos 1, 4, 5 et 6 sont des asphaltes purs qui ne diffèrent entre eux que par leurs proportions de bitume d'imprégnation.

Paris, 13 décembre 1878 — 15 février 1879.

L'ingénieur en chef, directeur du laboratoire,
Signé DURAND-CLAYE.

Vu par l'inspecteur de l'École,
Signé HERVÉ-MANGON.

PIÈCE C.

Tableau synoptique résumant les analyses faites par le laboratoire de l'École des ponts et chaussées sur les différents minerais d'asphalte les plus connus.

	VAL-DE-TRAVERS.	SEYSSEL.	LOBSANN.	SICILE.	MAESTU.	PORENS.
Eau et matières volatiles à 100° (1)	0,50	1,90	3,40	0,80	0,40	0,25
Bitume	10,10	8,00	11,90(2)	8,85	8,80	2,25
Carbonate de chaux	87,95	89,55	69,00	87,50	9,15	97,00
Sable siliceux	»	»	3,05	0,60	57,40	»
Alumine et peroxyde de fer	0,25	0,15	5,70(3)	0,90	4,35	0,15
Soufre	»	»	5,00	»	»	»
Carbonate de magnésie	0,30	0,10	0,30	0,95	8,10	0,20
Matières diverses insolubles dans les acides	0,45	0,10	»	»	11,35	0,05
Produits non dosés et perte	0,45	0,20	1,65	0,40	0,45	0,10
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

(1) La quantité d'eau renfermée dans les échantillons était très-variable, suivant le degré de siccité dans lequel chacun d'eux se trouvait au moment de l'analyse. Les chiffres relatifs à cette proportion ne doivent donc pas être tenus pour importants dans le résultat du dosage.

(2) Cette quantité paraît contenir une certaine proportion d'huile qui n'a pas été déterminée exactement et qui se trouverait à l'état de mélange avec le bitume.

(3) Y compris 4,45 de fer combiné au soufre.

PIÈCE D.

Note sur un procédé pour distinguer le brai de gaz du bitume naturel.

On fait digérer la matière dans le sulfure de carbone et on filtre.

La liqueur filtrée est évaporée à sec et chauffée jusqu'à ce qu'elle devienne, par le refroidissement, dure et cassante comme le brai. On s'arrange pour avoir environ 1 gramme de résidu desséché; on le broie dans un mortier et l'on opère sur la poudre ainsi obtenue.

On pèse 1 décigramme de cette poudre et on la met au fond d'un tube bouché. On ajoute 5 centigrammes cubes d'acide sulfurique Nordhausen. On ferme le tube avec un bouchon et on laisse digérer pendant 24 heures environ. On débouche et on étend de 10 centimètres cubes d'eau.

Cette dernière opération doit être faite avec précaution, à cause de la grande chaleur qui se développe pendant le mélange. On place le tube dans un verre rempli d'eau froide et l'on ajoute les 10 centimètres cubes d'eau avec une pipette en la laissant couler lentement le long des parois du tube; puis, avec une baguette de verre, on agite doucement et à plusieurs reprises, en laissant un intervalle assez long — un quart d'heure, par exemple — entre les reprises successives.

Quand le mélange est terminé, on le jette sur un petit filtre placé sur un entonnoir au-dessus d'une fiole de 150 à 200 grammes de capacité. Quand toute la liqueur a passé, ce qui est quelquefois assez long, on lave avec de l'eau froide jusqu'à ce qu'on ait versé 100 centimètres cubes d'eau de lavage.

La liqueur ainsi obtenue est incolore ou à peine colorée, lorsqu'on a opéré sur des bitumes naturels. Elle est, au contraire, d'un brun foncé, paraissant noir dans les fioles, si l'on a employé le brai de gaz. Si l'on opère sur des mélanges, on obtient des nuances intermédiaires.

L'intensité de ces nuances peut servir à doser approximativement les mélanges, si l'on a soin de se tenir toujours exactement dans les mêmes conditions. Il suffit de les comparer à celles qui donnent des mélanges de composition connue.

Pour comparer les couleurs, le mieux est de verser des volumes égaux des dissolutions dans des tubes de même diamètre et de les regarder au jour par transparence.

Paris, le 1er mai 1879.

L'ingénieur en chef, directeur du laboratoire de l'École des ponts et chaussées,

Signé DURAND-CLAYE.

N° 60

LE PONT SUSPENDU DE PITTSBURGH

[POINT BRIDGE]

(ÉTATS-UNIS)

NOTE

Par M. GARIEL, ingénieur des ponts et chaussées.

Le pont de Pittsburgh, qui est désigné en Amérique sous le nom de *Point Bridge*, et dont nous allons donner une description sommaire d'après des documents originaux recueillis à l'Exposition de 1878, a été érigé à l'embouchure de la rivière Monongahela pour relier la ville de Pittsburgh au faubourg South-Pittsburgh situé sur la rive sud du cours d'eau. Il a été construit avec des dispositions spéciales par l'*American Bridge Company* sur les plans et sous la direction de M. Hemberle.

Les conditions spéciales de la navigation exigeaient un libre débouché de 244 mètres entre les piles et une hauteur de $24^{m},40$ du tablier au-dessus du niveau des basses eaux dans l'axe du chenal qui se trouvait plus rapproché de la rive sud que de la rive opposée. De plus les rivages ne se trouvaient pas à la même hauteur, ce qui entraînait de nouvelles sujétions.

En principe il fut décidé que le pont présenterait une travée centrale de 244 mètres d'axe en axe des piles et deux travées latérales de $44^{m},20$ (Pl. 23, *fig.* 1 et 2).

Description générale. — Le système adopté pour la travée

centrale fut le système des ponts suspendus modifié comme nous allons l'expliquer : les travées latérales sont absolument indépendantes ; ce sont des poutres droites et nous n'avons pas, pour l'instant, à nous y arrêter. Occupons-nous spécialement de la travée centrale.

La longueur totale du pont, d'une extrémité à l'autre des massifs d'ancrage, est de 379^{m},50 : la chaîne s'élève jusqu'au sommet des tours placées à 68^{m},60 de ce même point, et à une hauteur de 54 mètres au-dessus des basses eaux. Elle s'abaisse ensuite jusqu'à l'axe du pont présentant une flèche de 26^{m},80, supérieure à celle que l'on accepte ordinairement, mais qui n'est cependant pas exagérée, eu égard aux dispositions que nous allons décrire. La chaîne est, en effet, raidie par l'action d'un système rigide qui, de chaque côté, part du sommet de la tour pour venir se terminer sur l'axe du pont. La chaîne et cette tige rectiligne sont d'ailleurs reliées invariablement, de telle sorte que le tablier ne puisse exécuter d'oscillations sans entraîner tout le système. D'autre part, le câble a, par construction, la forme de la chaînette, position d'équilibre, et le système rigide n'a été assemblé qu'après l'érection du pont, de telle sorte qu'il n'agit en aucune façon lorsque le tablier ne supporte aucune charge autre que son propre poids : il entre en action seulement sous l'action des charges roulantes.

Ajoutons que le tablier présente de chaque côté une rampe qui ne dépasse pas 0,035 et qui a permis d'élever le centre du tablier à 25^{m},30 au-dessus des basses eaux. La largeur du tablier, d'axe en axe des parapets, est de 10^{m},35 comprenant une chaussée de 6^{m},45 et deux trottoirs de 2 mètres.

Détails. — Les deux piles en rivière sont construites en maçonnerie et bâties sur une plate-forme en charpente posée à 3^{m},60 au-dessous du niveau des basses eaux. Chaque plate-forme a 26^{m},80 de longueur et 10^{m},35 de lar-

geur; la maçonnerie présente les dimensions suivantes : à la base, 26^{m},20 sur 9^{m},45 ; au sommet 16^{m},45 sur 7^{m},60. Elles ont été construites en pierre avec du mortier de ciment et l'exécution a été très-soignée.

Les culées, massifs d'ancrage, reposent également sur des plates-formes en charpente échouées sur un banc de gravier à 1^{m},50 environ au-dessous du niveau des basses eaux : elles ont 24^{m},70 sur 15^{m},85. Au-dessous de la route, la maçonnerie forme deux murs parallèles de 23^{m},40 de long et d'une largeur de 4^{m},88 à la base et de 3^{m},98 au sommet; ces murs se prolongent au-dessus du niveau du tablier et limitent ainsi latéralement la route à l'arrivée sur le pont: ils ont alors 17^{m},05 de longueur, 3^{m},05 de largeur et 6^{m},75 de hauteur. Les trottoirs sont, à cet endroit, placés en dehors des murs reposant sur des potences qui y sont fixées. Sous le niveau du tablier, les murs latéraux sont reliés par deux murs parallèles de 4^{m},20 d'épaisseur, l'intervalle entre ces murs étant rempli de grosses pierres. L'ancrage des câbles a lieu comme suit : le câble se termine par des chaînons forgés au marteau de 215 millimètres dont le plus inférieur, de 5 mètres de longueur est vertical, et se trouve relié par un boulon de 150 millimètres à la plaque d'ancrage, masse en fonte ayant 2^{m},40 sur 3 mètres et pesant 5.200 kilog. Les chaînons supérieurs ont seulement 3 mètres de longueur et sont disposés suivant une courbe par laquelle ils se relient à la chaîne (*fig.* 3, 4, 5).

Les tours sont entièrement construites en fer, excepté les bases des colonnes; chacune constitue pour ainsi dire une sorte de portique constitué par deux groupes latéraux de quatre colonnes reliées par des arcs; chaque colonne présente une section de 415 centimètres carrés à la base et de 350 centimètres carrés au sommet; les quatre colonnes d'un même groupe sont réunies par un treillis à mailles assez serrées (*fig.* 6, 8 à 11). Au sommet les colonnes sont reliées deux à deux par des poutres de 1^{m},50 de haut entretoisées

par cinq poutres de $0^m,46$ sur lesquelles reposent des plaques d'acier ; sur celles-ci sont placés les rouleaux de $0^m,11$ de diamètre et de $1^m,38$ de longueur. Enfin sur ces rouleaux se trouvent les selles constituées par douze plaques de tôle de $0^m,65$ de largeur et $0^m,055$ d'épaisseur, reliées les unes aux autres et fixées à leurs extrémités aux chaînes par des boulons de $0^m,15$ de diamètre. Nous n'insistons pas sur la disposition des arcs et des passages de la chaussée et des trottoirs que les figures font suffisamment comprendre.

Les chaînes sont formées par des chaînons plats de $6^m,25$ de longueur de centre en centre des boulons d'assemblage; ces chaînons sont, suivant les points disposés sur 11, 12 ou 14 rangs : la section totale de la chaîne qui unit la selle à l'ancre est de 1.240 centimètres carrés; pour la chaîne de la travée principale, la section décroît de 1.175 centimètres carrés près des tours jusqu'à 1.080 près du centre : cette différence s'explique par la variation de l'inclinaison de la chaîne.

Le système raidisseur est constitué par une poutre en ∩ de $0^m,55$ de largeur sur $0^m,33$ de hauteur reliée au câble par des pièces normales de $0^m,30$ de largeur; celles-ci sont articulées sur le câble et rivées sur la poutre; les tiges situées près du centre n'ont été fixées qu'après l'érection complète du pont. Des tirants sont placés diagonalement de manière à augmenter la raideur; enfin, sauf près du centre, des poutres horizontales relient les deux câbles et les deux poutres en ∩, et les tirants diagonaux contreventent le système et s'opposent aux déplacements latéraux (Pl. 23, *fig.* 7).

Les poutres du tablier sont des poutres en treillis de $2^m,40$ de hauteur : elles sont situées extérieurement aux trottoirs et leur semelle supérieure forme main-courante; elles sont suspendues à la chaîne par des tiges de fer de $0^m,048$ de diamètre et espacées de 6 mètres; elles sont reliées l'une à l'autre par des poutres transversales de $0^m,90$

de hauteur également distante de 6 mètres et qui supportent deux longuerines qui aident à porter le tablier. La raideur de ce système dans le sens horizontal est obtenue à l'aide de tirants diagonaux auxquels sont adjoints quatre câbles d'acier de $0^m,065$ de diamètre situés au-dessous du tablier et ancrés dans les piles (*fig.* 2).

Évaluation de la résistance. — Les dimensions des diverses pièces ont été calculées en admettant une charge roulante de 245 kilog. pour 1 mètre carré lorsqu'il s'est agi des tours, des câbles et du système raidisseur, et de 340 pour le tablier et les tiges de suspension. Les efforts admis étaient, au maximum, par centimètre carré; de 955 kilog. pour les chaînes; de 715 pour les tours; de 636 pour les tiges de suspension et de 955 à la tension et 795 à la compression pour la partie principale du système raidisseur. Les efforts maximums ont été calculés comme suit :

Pour la chaîne, avec le pont entièrement chargé;

Pour les tours, avec le pont entièrement chargé et une pression due au vent de 145 kilog. par mètre carré, d'une part; et d'autre part avec le pont non chargé et une pression du vent de 245 kilog.;

Pour la poutre principale du système raidisseur avec la surcharge seulement : le maximum de tension au centre fut évalué en admettant le pont chargé sur une moitié, d'une tour au centre; le maximum de tension près de la tour en supposant le pont chargé sur les deux tiers à partir de la tour opposée; pour la poutre en considérant une charge couvrant la moitié de la travée et avançant jusqu'à en couvrir les deux tiers. Le maximum de compression dans cette même pièce fut déterminé en supposant que le tablier fût déchargé sur la partie qui correspond au maximum de tension, et chargé sur la partie qui aurait dû être déchargée pour produire ce maximum de tension.

Le calcul des autres pièces ne présente rien de spécial.

Construction du pont. — Les travaux commencèrent le 1er juillet 1875, et, dès l'hiver suivant, les maçonneries étaient très-avancées. Les opérations furent reprises au printemps suivant et se continuèrent sans interruption jusqu'à l'entier achèvement de l'ouvrage. Une partie du travail, et non la moins difficile, comme l'établissement des chaînes et des poutres rigides, fut poursuivie pendant l'hiver par des températures très-froides et de forts vents. Le pont fut ouvert à la circulation le 1er avril 1877 ; les travaux accessoires d'ornementation et de peinture furent terminés deux mois plus tard.

L'installation des plaques et des chaînes d'ancrage se fit en même temps que la construction des maçonneries correspondantes. Un échafaudage établi entre la culée et la pile servit à monter la poutre de chaque travée latérale ; il fut ensuite surélevé pour servir de support à la chaîne dans la partie correspondante. Cette dernière partie reposait partiellement sur la travée même, afin de parer aux inconvénients qui auraient résulté de l'entraînement de la partie inférieure par les crues ou les glaces : ces accidents se produisirent, en effet, sans qu'il en résultât aucun dommage pour l'ouvrage.

En même temps on construisait les tours à l'aide d'un échafaudage placé à leur intérieur ; les colonnes de fer furent apportées en trois sections d'environ 10 mètres chacune, qui furent élevées successivement et rivées après leur mise en place ; les treillis furent d'abord boulonnés sur ces colonnes, et le rivetage ne fut opéré qu'après l'achèvement des tours. Lorsque les quatre colonnes furent terminées, on nivela leurs sommets et on les surmonta de plaques de fer dont l'épaisseur fut déterminée exactement pour que le coussinet qui devait supporter la selle portât également sur chaque colonne. Les selles furent placées à $0^m,04$ en arrière de leur position définitive, de manière à reprendre celle-ci lorsque les chaînes qui les reliaient à

l'ancrage se tendraient sous l'action de la chaîne de suspension.

L'érection des chaînes de suspension se fit à l'aide de faux câbles reliés aux chaînes de rive (Pl. 24, *fig.* 1 à 5). Ces faux câbles, qui devaient être utilisés plus tard sous le tablier pour le contreventer, étaient formés de fils d'acier réunis en cordes de $0^m,06$ de diamètre; trois de ces cordes constituaient un câble, et deux câbles servaient pour l'érection de chacune des chaînes de suspension qui furent posées successivement. Ces deux câbles étaient placés à $1^m,52$ de distance l'un de l'autre au-dessus de la chaîne. Ils étaient reliés à la chaîne de rive par un système spécial muni de tendeurs à vis (Pl. 24, *fig.* 10). La résistance des deux câbles était évaluée à 1.260 tonnes; l'action de la chaîne, dont le poids atteignait 400 tonnes, produisit un allongement notable; l'augmentation de flèche qui en devait résulter avait été évaluée de $1^m,82$: elle fut en réalité de $1^m,97$.

Les cordes qui devaient constituer chaque câble furent placées séparément, après avoir été coupées d'égale longueur; on leur donna la même courbure en agissant sur les boulons qui les reliaient aux sabots auxquels elles étaient suspendues. A l'aide d'un échafaudage volant mobile sur ces cordes et susceptibles de porter quatre hommes et une petite forge, on réunit ces cordes ensemble par des liens distants de $1^m,20$; les câbles ainsi formés étaient reliés l'un à l'autre, à des distances de $6^m,25$, par des traverses auxquelles, par l'intermédiaire de tirants, devaient être suspendus les chaînons de la chaîne de suspension. Ce travail fut effectué en allant du centre vers les piles; le mouvement était communiqué à cet échafaudage par l'intermédiaire de cordes reliées à des machines motrices placées sur les massifs d'ancrage.

L'établissement de la chaîne de suspension se fit à l'aide d'une plate-forme mobile dite *voyageuse* (*traveler*), de $5^m,50$ de large sur $9^m,75$ de long (*fig.* 6, 7, 8); un cadre supérieur,

reposant sur les deux câbles auxiliaires par l'intermédiaire de six poulies, supportait cette plate-forme par l'axe médian; des moufles placés aux extrémités permettaient de maintenir celle-ci horizontale, malgré l'inclinaison du cadre. Le mouvement était communiqué à la plate-forme par une corde de fils d'acier de $0^{m},022$ de diamètre.

Les diverses pièces constituant la chaîne étaient apportées sur la travée latérale au pied des tours et montées jusqu'au plancher supérieur de l'échafaudage fixe, contre lequel venait se placer la plate-forme voyageuse; celle-ci fut ensuite redescendue jusqu'au centre, où elle rencontra la plate-forme partie de l'autre rive; l'assemblage central fut effectué, puis le travail fut continué de part et d'autre en remontant, les plates-formes revenant régulièrement à la partie supérieure prendre les nouvelles pièces nécessaires à l'établissement de la chaîne et à sa liaison avec la poutre rigide. D'autre part, les premières sections près des tours furent établies directement sur l'échafaudage. Lorsque tous les assemblages furent faits et les pièces mises en place, sauf celles qui constituaient la 2e section près des tours, les câbles auxiliaires étaient trop élevés au centre, et par suite la chaîne trop longue; les sections qui restaient à assembler formaient une ligne brisée (Pl. 24, *fig.* 2). Les pièces furent réunies, et peu à peu les câbles de suspension furent détendus jusqu'à ce que la chaîne principale restât abandonnée à elle-même.

La première chaîne étant ainsi terminée, les deux câbles furent disjoints et transportés de l'autre côté; on se servit pour cela d'une poutre horizontale située un peu au-dessous du sommet des tours et portant un rail sur lequel on fit rouler une poulie à laquelle on avait relié le câble (*fig.* 4).

La seconde chaîne fut montée absolument comme la première; trente jours de travail suffirent pour placer et assembler les 320 tonnes de fer qui la constituent.

On établit ensuite successivement les tirants, les entretoises, le tablier et les câbles inférieurs de contreventement. Lorsque le tablier fut entièrement posé, on enleva les échafaudages latéraux, et le pont fut abandonné librement, étant alors seulement un pont suspendu ne présentant aucune disposition spéciale.

En cet état incomplet, le passage d'un seul attelage produisit des oscillations longitudinales considérables; la raideur latérale était parfaite, sous une pression du vent, de 35 kilog. par mètre carré.

C'est alors seulement que fut placée la poutre inclinée destinée à donner de la raideur au système : elle fut établie à partir des tours vers le centre. On établissait en même temps les entre-toises; les diverses parties furent assemblées et rivées de telle sorte que la résistance des assemblages fût égale à la résistance de la poutre même. Quand toutes les sections furent placées, à l'exception des quatre qui aboutissaient au centre sur chaque chaîne, on mesura directement la longueur à leur donner, et on les mit en place en tendant le système de telle sorte que l'effort du système raidisseur fut exactement égal à la charge permanente du pont.

Bien que tous les tirants eussent été calculés de manière à présenter la longueur exacte qu'ils devaient avoir, ils furent munis d'une partie filetée et maintenus provisoirement en place; ils ne furent définitivement fixés que lorsque toutes les autres pièces du pont furent en place. Enfin les potelets, qui de 30 en 30 mètres relient les chaînes aux poutres du tablier, ne furent adaptés qu'en dernier lieu; quelques oscillations longitudinales qui étaient produites par l'action du vent disparurent absolument après la pose de ces dernières pièces.

Essai du pont. — Les épreuves furent exécutées à l'aide de voitures chargées de fer et placées par deux de front; le poids total sur la travée centrale s'éleva à 475 tonnes.

Les voitures les plus chargées étaient en avant et les moins chargées en arrière, de telle sorte que 300 tonnes étaient réunies sur une demi-travée. L'abaissement du tablier fut de $0^m,098$.

Le pont étant chargé sur la moitié seulement de sa longueur, il y eut un abaissement de $0^m,070$ de la partie surchargée, et, par suite, un relèvement de $0^m,028$ de la demi-travée non chargée.

Sous l'influence d'une charge roulante, il se produisit des oscillations verticales ne dépassant pas $0^m,0016$ et des déplacements horizontaux qui, au centre du pont, n'atteignaient pas $0^m,008$.

Ces épreuves ont été considérées comme affirmant le succès complet de ce pont d'un nouveau système.

Quantités de matériaux; prix de l'ouvrage. — Nous relevons les chiffres suivants dans le mémoire auquel nous avons emprunté les renseignements précédents :

Fer dans les fondations	42 tonnes.
Maçonnerie dans les murs d'ancrage . .	8.300 mètres cubes
Maçonnerie des piles.	5.700 —
Fer	2.014 tonnes.
Fonte.	52 —
Acier.	32 —

Le détail de la superstructure est le suivant :

	FER.	FONTE.	ACIER.
Deux travées latérales.	149	2,2	»
Ancres, chaînes de rive, etc.	472	24,0	»
Tours	324	20,4	14
Chaînes de suspension entre les tours.	552	»	»
Boulons pour les chaînes	19	»	»
Poutres raidissant les chaines.	195	»	»
Entre-toises	51	»	»
Tiges de suspension	40	»	»
Poutres du tablier	74	»	»
Pièces métalliques du tablier	87	»	»
Main-courante, voie et divers.	51	5.4	»
Câbles sous le tablier.			18
Totaux.	2014	52	32

Le prix du pont s'est élevé environ à 2.625.000 francs, savoir :

	francs.
Maçonneries et fondations	997.500
Superstructure	1.350.000
Approches et divers	277.500
Total	2.625.000

Ce qui, pour une longueur totale de 380 mètres, représente 6.900 francs environ par mètre linéaire.

ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES.

CHRONIQUE.

Novembre 1879.

N° 61

Essais et expériences sur l'acier doux. — Le Bureau-Véritas de Bruxelles a fait des essais importants sur l'acier doux employé dans la construction des navires. Nous extrayons des rapports qui ont été publiés quelques chiffres qui paraissent n'être pas sans intérêt.

Pendant les expériences, la température des chambres d'essai a été maintenue à 20° environ; les épreuves se faisaient à l'aide d'une presse hydraulique permettant d'atteindre 20 tonnes. La charge initiale était de 4 tonnes (de 1.016 kilogr.), et on l'augmentait par demi-tonne jusqu'à 6 tonnes, puis par quart de tonne jusqu'à la rupture.

Des échantillons d'acier doux Bessemer recuit, provenant de la société J. Cockerill, ont donné à la rupture une résistance de 45 à 49 kilogr. par millimètre carré de section primitive, avec un allongement de 20 à 25 p. 100 (longueur entre les repères 200^{mm}). La valeur de la traction qui correspondait à la limite de l'élasticité était de 29 à 36 kilogr.

L'acier doux de Motala a donné une résistance à la rupture de 50 à 51 kilogr. par millimètre carré, avec une charge à l'allongement élastique de 29 à 32 kilogr. et un allongement à la rupture de 27 à 33 p. 100 (sur une longueur de 100^{mm}).

Des expériences analogues faites sur des tôles de qualité supérieure fabriquées en France donnent 39 à 41 kilogr. comme charge de rupture, 23 à 24 pour l'allongement élastique et un allongement à la rupture de 10 à 14 p. 100 (longueur d'épreuve 200^{mm}).

D'autres recherches ont été opérées relativement à la flexion pour des tôles de fer et des tôles d'acier; on a reconnu qu'une tôle

de fer de 12 millimètres peut être remplacée par une tôle d'acier de 11 millimètres.

Ces données fournissent quelques renseignements intéressants au point de vue numérique; elles ne pourraient cependant remplacer des mesures directes effectuées sur les matériaux que l'on aurait à employer dans un ouvrage important.

Accidents sur les chemins de fer. Statistique. — Nous extrayons de diverses publications les chiffres suivants relatifs aux accidents de chemins de fer :

SUISSE, 1878. — La longueur du réseau exploité a été en moyenne de 2.576 kilom.; le nombre des trains ordinaires et extraordinaires s'est élevé à 266.899, correspondant à un parcours de 10.942.047 kilom.

Il y a eu pendant l'année 53 déraillements et 13 rencontres, répartis ainsi :

Sur les lignes, 19 déraillements, 1 rencontre.
Dans les stations, 34 déraillements, 12 rencontres.

Ces accidents ont causé la mort de 1 voyageur et ont occasionné des blessures à 3 employés. On a eu à déplorer, pour d'autres causes, la mort de 54 personnes (5 voyageurs, 22 employés et 27 autres personnes), et 74 personnes ont été blessées (10 voyageurs, 52 employés et 12 autres personnes). Les cas dus à l'imprudence des voyageurs ou au hasard correspondent à 54 tués et 67 blessés, les cas dus à la faute des employés sont au nombre de 7. Ajoutons enfin qu'il y a eu 13 suicides sur les lignes suisses.

ALLEMAGNE. — Les 57 principales lignes ferrées de l'Allemagne représentent une longueur de 26.902 kilom., et ont été parcourues par 233.458 trains, savoir :

10.327	trains postes ou express,
77.987	trains ordinaires,
40.172	trains mixtes,
67.063	trains de marchandises.
soit 195.549	trains réglementaires,
et 11.057	trains de voyageurs supplémentaires,
26.852	trains de marchandises supplémentaires,
soit 37.909	trains supplémentaires.

Pendant cette année 1878, 559 trains ont eu des retards; 14 trains en marche ont déraillé et il y a eu 7 collisions. Pendant l'organisation des trains, dans les stations, il y a eu 32 déraillements et 16 collisions.

A la suite de ces accidents, il y a eu 10 personnes blessées; 26 personnes ont été tuées par leur propre imprudence et 9 se sont suicidées. Le nombre des voyageurs s'est élevé à 14.088.442.

Dans le personnel des chemins de fer, il y a eu 1 tué sur 9.632 et 1 blessé sur 3.202.

ANGLETERRE. — La longueur exploitée sur les lignes du Royaume-Uni, pendant l'année 1878, a été de 27.888 kilom.; le nombre des voyageurs, non compris les porteurs de cartes d'abonnement, s'est élevé à 565.024.455.

Le nombre des personnes tuées par suite de l'exploitation des chemins de fer a atteint 1.103, et celui des blessés 4.007. Ces chiffres se décomposent ainsi :

Voyageurs : 125 tués et 1.752 blessés.

Employés des compagnies et des entrepreneurs :
554 tués et 2.003 blessés.
Enfin : 384 tués et 252 blessés.

correspondent aux suicides, et aux accidents dus à l'inobservation des règlements aux passages à niveau, etc.

La proportion des personnes atteintes par suite de circonstances qu'elles n'auraient pu éviter, a été de 1 tué sur 23.400.000 voyageurs et de 1 blessé sur 481.000; ces chiffres sont de 1 tué sur 4.520.000 et 1 blessé sur 332.000, si l'on tient compte de tous les accidents arrivés aux voyageurs.

C. M. G.

N° 62

VOUTES BIAISES.

SIMPLIFICATION PRATIQUE
DE
L'APPAREIL ORTHOGONAL CONVERGENT.

APPLICATION AU PONT SOUTERRAIN DES KŒURS.

NOTE

Par M. A. PICARD, ingénieur des ponts et chaussées.

PREMIÈRE PARTIE.

THÉORIE DE L'APPAREIL CONVERGENT SIMPLIFIÉ.

CHAPITRE I.

OBJET DE LA NOTE.

§ 1er. — Appareil des ponts biais d'une faible longueur.

Appareil orthogonal parallèle. — Pour les ponts biais d'une faible longueur, l'appareil le plus rationnel, celui qui réduit au minimum les poussées au vide, est sans contredit l'*appareil orthogonal parallèle.*

Il consiste à prendre pour lignes de joints sur la douelle, d'une part des courbes parallèles à l'arc de tête, et d'autre part des courbes coupant celles-ci à angle droit et constituant leurs *trajectoires orthogonales.*

Dans l'application, il présente l'inconvénient :

— de nécessiter un tracé relativement difficile ;

— de faire varier d'une manière continue les largeurs des voussoirs d'une même assise ;

— d'exiger par suite une taille pénible et coûteuse et d'interdire l'emploi de matériaux de dimensions uniformes.

Appareil héliçoïdal. — Aussi les Anglais, gens pratiques avant tout, l'ont-ils simplifié en le remplaçant par l'*appareil héliçoïdal* qui en dérive par la substitution des cordes des arcs de tête à ces arcs eux-mêmes dans le développement de la douelle.

Les lignes d'assises ou de lits sont ainsi transformées :

1° sur le développement, en droites perpendiculaires à ces cordes et par suite parallèles entre elles ;

2° sur la douelle, en hélices de même pas et d'un tracé facile.

Les pierres composant une même assise ont d'ailleurs une largeur uniforme.

L'appareil orthogonal et l'appareil héliçoïdal diffèrent très-peu l'un de l'autre pour des voûtes plates et d'un biais peu accusé.

Lorsque au contraire la montée de la voûte devient considérable et lorsque le biais est prononcé, l'appareil approché s'écarte de l'appareil théorique et donne vers les naissances et vers la clef, à la rencontre des plans de lits et du plan de tête, des angles aigus qui peuvent compromettre, dans une certaine mesure, la stabilité de la construction, si les matériaux ne sont pas d'excellente qualité.

On n'en est pas moins parvenu à l'adapter même à des arches en plein cintre comportant un biais assez notable :

a — en appareillant suivant les génératrices et les sections droites les parties de la voûte situées au-dessous des joints de rupture, qui n'ont rien à craindre de la poussée au vide, comme l'a démontré l'expérience ;

b — en plaçant une crémaillère au niveau de chacun de ces joints;

c — en n'appliquant ainsi l'appareil biais qu'à la partie supérieure de la voûte et en en réduisant l'amplitude à un angle au centre de 120°.

Grâce à cet artifice, l'appareil héliçoïdal est à peu près le seul en usage pour les arches biaises de peu de longueur.

§ 2. — Appareils usités pour les ponts biais d'une grande longueur.

Division de la voûte en trois zones. — Quand la distance des têtes de l'arche devient considérable, on ne l'appareille plus en biais sur toute sa longueur.

On la divise en trois zones, savoir :

— deux zones comprises entre les plans de tête et des sections droites peu éloignées de ces plans, auxquelles on applique un appareil biais;

— une zone médiane que l'on appareille en voûte droite.

Quelquefois on emploie l'appareil héliçoïdal pour les zones de tête qu'on limite alors par des crémaillères à leur jonction avec la zone médiane.

Souvent aussi on adopte l'*appareil orthogonal convergent.*

Appareil orthogonal convergent. Ses inconvénients pratiques. — Ce dernier appareil, qui donne au point de vue théorique la solution la plus satisfaisante, consiste à prendre pour lignes de joints sur la douelle :

— les sections du cylindre d'intrados par des plans convergents vers l'intersection de ceux qui limitent les zones de tête;

— les trajectoires orthogonales de ces sections.

Dans l'application, malgré les belles études dont il a fait l'objet de la part d'un certain nombre d'ingénieurs et de savants, et notamment de M. l'inspecteur général Lefort (*Annales des ponts et chaussées*, 1839) et de M. l'inspecteur général Graëff (*Annales des ponts et chaussées*, 1852. *Traité*

de l'appareil et de la construction des ponts biais), il présente, à un plus haut degré encore, tous les inconvénients de l'appareil orthogonal parallèle et n'est pas d'une application facile dans un service chargé où l'ingénieur et ses collaborateurs sont absorbés par la rédaction de nombreu projets et la surveillance de chantiers multiples.

Présentation d'une note sur l'appareil convergent simplifié. — Ayant eu à construire sur le canal de l'Est, sous les ordres de M. l'ingénieur en chef Poincaré, une arche à têtes biaises de 50 mètres de longueur au passage du chemin de fer de Lérouville à Sedan et de la route nationale n° 64 de Neufchâteau à Mézières, nous y avons employé d'après les indications de M. Frécot, inspecteur général directeur du canal, un appareil convergent simplifié qui nous a donné d'excellents résultats.

Cet appareil étant peu connu, nous croyons utile de lui donner la publicité des *Annales* : tel est l'objet de la présente note.

CHAPITRE II.

PRINCIPE ET CARACTÈRE DE L'APPAREIL CONVERGENT SIMPLIFIÉ.

---

§ 1er. — Principe de l'appareil convergent simplifié.

Développement d'une zone de tête et de ses sections par des plans convergents. — Considérons une voûte dont la projection horizontale serait *a*'A'B*b* (Pl. 25, *fig.* 1).

Soit A'B le plan de tête, C'D le plan de section droite et C'A'BD la zone à appareiller en biais (*).

Développons, suivant l'usage, la douelle sur le plan des naissances, en la faisant tourner autour de la génératrice B*b* comme charnière ; la transformée de la courbe de tête sera

(*) Nota.— La *fig.* 1, Pl. 25, suppose que la section droite est en plein cintre. Mais nos raisonnements et l'appareil qui en fait l'objet sont indépendants de la forme de cette section.

l'arc de sinusoïde BA, celle de la section droite sera la ligne droite DC perpendiculaire à la charnière.

Coupons ensuite le cylindre d'intrados, comme s'il s'agissait d'appliquer l'appareil orthogonal convergent, par une série de plans concourant vers l'arête d'intersection E′ des deux plans limitant la zone biaise. Les sections ainsi obtenues seront des ellipses et auront pour transformées, dans le développement, des arcs de sinusoïdes dont les trajectoires orthogonales constitueraient les lignes d'assises ou de lits de l'appareil orthogonal convergent.

Remplacement des transformées des sections par leurs cordes. Trajectoires orthogonales de ces cordes. — Les cordes de tous ces arcs concourent vers un même point E de la droite DC, attendu :

— qu'elles divisent la génératrice A*a* en segments égaux à ceux que les plans de section détachent sur la projection horizontale de cette génératrice ;

— et que par suite elles partagent les deux droites B*b* et A*a* en parties proportionnelles.

Substituons ces cordes aux transformées des sections.

Leurs trajectoires orthogonales deviennent évidemment des circonférences concentriques décrites du point E comme centre.

Ce sont ces circonférences que nous prenons comme lignes de lits.

Définition des lignes de joints. — Ainsi, dans ce système, les transformées des traces des joints sur l'intrados sont :

— d'une part, des lignes droites convergeant vers le point d'intersection des cordes des transformées des deux sections limitant la zone de tête ;

— d'autre part, des circonférences concentriques décrites de ce point d'intersection comme centre.

Analogie du système convergent simplifié avec le système héliçoïdal. — L'appareil simplifié dont nous venons de donner sommairement le principe et que l'on peut appeler

appareil circulaire convergent se déduit donc du système orthogonal par un artifice semblable à celui qui a permis de passer de l'appareil orthogonal parallèle à l'appareil héliçoïdal.

§ 2. — Avantages de l'appareil simplifié et comparaison avec l'appareil théorique.

Avantages de l'appareil simplifié. — L'appareil circulaire convergent offre le précieux avantage :

— de comporter une facilité extrême pour le tracé des lignes de joint dans le développement de la douelle;

— de rendre aussi très-simple et très-sûr le tracé des lignes de lits ou d'assises sur le cintre au moyen de leurs points d'intersection avec les génératrices, points dont la détermination se réduit à des opérations graphiques ou à des calculs rapides;

— enfin et surtout, de rendre uniforme la largeur des assises, de permettre par conséquent l'emploi de matériaux ordinaires et de dimensions courantes et de supprimer les difficultés de taille inhérentes à l'appareil orthogonal convergent.

Son seul inconvénient est d'exiger des crémaillères aux naissances; mais cet inconvénient ne saurait être mis un instant en balance avec les avantages ci-dessus énumérés.

Comparaison de l'appareil simplifié et de l'appareil convergent. — Cet appareil se rapproche d'autant plus du système orthogonal qu'on l'applique à une voûte plus plate et moins biaise et qu'on augmente davantage le rayon des transformées circulaires des lignes de lits ou d'assises, c'est-à-dire la longueur des zones extrêmes.

Quoiqu'on fasse, il donne sur les voussoirs de l'archivolte des angles s'écartant dans une certaine mesure de l'angle droit.

Mais il est toujours facile d'y pourvoir, autant que l'exige la nature des matériaux :

— soit en accroissant le rayon des transformées des lignes d'assises, comme nous venons de le dire ;

— soit en réduisant l'appareil biais à la partie de l'arche comprise entre les joints de rupture, si l'intrados s'étend au-dessous de ces joints, et en plaçant les crémaillères à leur niveau, ainsi que nous l'avons expliqué à propos de l'application du système héliçoïdal au plein cintre.

Au cas particulier, cette réduction n'entraîne aucune sujétion supplémentaire, puisqu'il faut, en tout état de cause, deux crémaillères.

§ 3. — Correction dans la région des archivoltes de tête et détermination du point de convergence.

Correction du système par l'application de l'appareil héliçoïdal à la région des archivoltes de tête. — L'application pure et simple du système qui vient d'être décrit nécessiterait des joints courbes pour les voussoirs de l'archivolte, qui sont en général des pierres de taille et dont les dimensions sont par suite trop considérables pour qu'il soit possible de négliger dans leur étendue la courbure des lignes d'assises circulaires.

Il en résulterait une complication regrettable.

Pour l'éviter, il suffit d'employer l'appareil héliçoïdal entre la courbe de tête et une parallèle à la corde de la transformée de cette courbe passant par le point le plus rentrant de la douelle des voussoirs de tête, et de n'appliquer l'appareil convergent qu'au delà de cette corde (voir Pl. 26, *fig.* 3).

Détermination du point de convergence. — On détermine comme il suit la section droite à laquelle doit être arrêté l'appareil biais.

On commence par procéder à la division de la courbe de tête en parties correspondant aux voussoirs de l'archivolte et par tracer l'appareil héliçoïdal de ces voussoirs, sur le développement de la douelle.

On partage de même en assises le corps droit de la voûte, en ayant soin d'attribuer aux moellons une largeur qui divise exactement celle des voussoirs de tête.

Puis on attribue à la section cherchée une position provisoire.

Il n'y a pas à cet égard de règle fixe; la longueur de la zone biaise varie nécessairement avec la forme et l'ouverture de l'arche; cependant on arrivera presque toujours à un résultat convenable en prenant un rayon assez grand pour rendre insensible la flèche des lignes de lits de douelle dans l'étendue d'un moellon.

Du centre de convergence donné par cette section provisoire on trace un arc de cercle passant par l'un des points de division de la ligne oblique qui limite l'appareil héliçoïdal.

Si cet arc n'est pas tangent à l'une des génératrices formant lignes de lits de la partie droite de la voûte, on choisit parmi ces lignes celle qui se rapproche le plus du contact.

Enfin on cherche sur l'oblique précitée le centre d'une circonférence satisfaisant à la double condition : 1° d'être tangente à cette génératrice; 2° de passer par le point de division qui a servi à déterminer la première circonférence auxiliaire.

Le centre ainsi obtenu est celui qui sert définitivement au tracé de l'épure du développement.

CHAPITRE III.

ÉQUATIONS DES LIGNES DE LITS, DE LEURS TRANSFORMÉES ET DE LEURS PROJECTIONS SUR DIVERS PLANS. — PROPRIÉTÉS FOCALES DES NORMALES AUX PROJECTIONS DES LITS SUR DES PLANS PARALLÈLES AUX GÉNÉRATRICES.

---

§ 1er. — Équations des lignes de lits, de leurs transformées de leurs projections. — Énoncé des propriétés focales.

A — *Cas d'une section droite circulaire. — Équations des*

lignes de lits et de leurs transformées. — La présente note ayant un but exclusivement pratique, nous nous bornerons à étudier avec quelques détails le cas d'une voûte dont la section droite serait circulaire; c'est celui que nous avons eu à traiter et auquel s'appliquera le plus généralement l'appareil convergent simplifié. Les formules spéciales aux autres cas s'établiraient d'ailleurs d'une manière analogue.

Cherchons tout d'abord l'équation générale des transformées des lignes de lits dans le développement de la douelle et à cet effet désignons par :

r le rayon de la section droite du cylindre (voir Pl. 25, *fig.* 1);

e la distance CE du point de convergence E à la génératrice aC;

R le rayon de la transformée MN d'une ligne de lits;

α l'angle formé par le plan des naissances et un plan diamétral passant par une génératrice quelconque ou l'arc sous-tendu par cet angle dont le rayon serait égal à l'unité;

γ l'angle des deux plans limitant la zone appareillée en biais.

Prenons pour origine des coordonnées le point E, pour axe des X le développement ED de la section droite et pour axe des Y une perpendiculaire à cette droite.

Les coordonnées d'un point quelconque P de la transformée d'une ligne de lit MN doivent satisfaire à la relation :

$$Y^2 + X^2 = R^2. \qquad (1)$$

Or on a d'autre part :

$$X = e + \pi r - r\alpha. \qquad (2)$$

On peut donc mettre l'équation (1) sous la forme :

$$Y^2 + (e + \pi r - r\alpha)^2 = R^2, \qquad (3)$$

ou plus simplement, par un changement dans l'origine des angles,

$$Y^2 + r^2\alpha'^2 = R^2. \qquad (4)$$

Telle est l'équation générale des transformées des lits; telle est aussi l'équation de ces lits eux-mêmes sur le cylindre.

Équations des projections des lignes d'assises sur le plan des naissances. — Passons maintenant à l'équation des projections des lignes de lits sur le plan des naissances, en prenant pour origine des coordonnées le centre o de la section droite, pour axe des x la projection oD de cette section et pour axe des y une droite perpendiculaire oo'.

L'ordonnée d'un point quelconque P′ de la ligne de lit M′N′ est la même que celle du point correspondant P de la transformée MN.

Son abscisse satisfait aux relations:

$$x = r \cos \alpha, \qquad (5)$$

ou

$$\alpha = \text{arc} \cos \frac{x}{r}. \qquad (6)$$

Transportant cette dernière valeur de α dans l'équation (3) on a:

$$y^2 + \left(e + \pi r - r \text{ arc} \cos \frac{x}{r}\right)^2 = \text{R}^2. \qquad (7)$$

Telle est l'équation cherchée.

En déduisant de cette équation celle de la normale à la projection d'une ligne d'assise en un point placé sur la génératrice déterminée par l'angle α, il est facile de reconnaître:

— que l'abscisse de l'intersection de cette normale avec l'axe des x a pour valeur

$$x' = r \cos \alpha - \frac{e + \pi r - r\alpha}{\sin \alpha}; \qquad (8)$$

— qu'ainsi elle est indépendante de l'ordonnée du point considéré ainsi que du rayon de la transformée;

— et que par suite *toutes les normales aux projections des lignes de lits aux points où ces lignes coupent une même génératrice concourent vers un foyer unique situé sur la trace du plan de section droite auquel est limité l'appareil biais.* (Voir Pl. 25, *fig.* 1.)

Pour $\alpha = 0$ et pour $\alpha = 180°$, ce foyer est à l'infini, c'est-à-dire que les projections des lignes de lits sont tangentes à celles des génératrices des naissances, ce qui est évident *à priori* puisque les deux plans tangents à la douelle suivant ces génératrices sont des plans projetants.

Pour $\alpha = 90°$, le foyer est à gauche de l'origine des coordonnées à une distance de cette origine égale à $e + \frac{\pi r}{2}$.

La propriété que nous venons d'énoncer et dont nous nous réservons de donner dans la suite de notre mémoire une démonstration géométrique très-simple, peut, dans certains cas, aider au tracé de l'épure en permettant de mener rapidement les tangentes aux projections des lits au droit de quelques génératrices et de réduire ainsi le nombre des points de ces courbes à déterminer par abscisses et ordonnées.

Équations des projections des lignes de lits sur un plan vertical passant par l'axe de la voûte. — L'équation des projections des lits sur le plan vertical passant par l'axe de la voûte s'établit comme il suit :

Prenons pour origine des coordonnées la projection o'' du centre de la section droite CD, pour axe des x la projection de cette section et pour axe des y celle des génératrices des naissances (Pl. 25, *fig.* 1).

L'ordonnée y d'un point quelconque P'' du lit $M''N''$ est égale à celle du point correspondant P de la transformée.

Son abscisse x est liée à l'angle α par les relations

$$x = r \sin \alpha, \qquad (9)$$

ou

$$\alpha = \text{arc} \sin \frac{x}{r}. \qquad (10)$$

L'équation cherchée est donc :

$$y^2 + \left(e + \pi r - r \text{ arc sin } \frac{x}{r}\right)^2 = R^2. \tag{11}$$

Ici encore *les normales aux projections des lignes de lits aux points où ces lignes coupent une même génératrice concourent vers un foyer unique situé sur la trace du plan de section droite auquel est limité l'appareil biais.*

L'abscisse de ce foyer est

$$x'' = r \sin \alpha + \frac{e + \pi r - r\alpha}{\cos \alpha}. \tag{12}$$

Pour $\alpha = 0$, cette abscisse est $e + \pi r$; pour $\alpha = 180°$, elle est e ; pour $\alpha = 90°$, le foyer est à l'infini, c'est-à-dire que les projections des lits sont tangentes à celle de la génératrice du sommet.

Équations des projections des lignes de lits sur le plan des têtes. — Cherchons enfin l'équation des projections des lits sur le plan de tête. Prenons à cet effet pour origine des coordonnées le point o''' projection du centre o de la section droite C'D, pour axe des x la trace o'''B du plan de tête et pour axe des y la droite perpendiculaire $o'''y$ (Pl. 25, *fig.* 1).

L'ordonnée $P'''p'''$ d'un point quelconque de $M'''N'''$ est égale à $p'\pi$ ou à $r \sin \alpha$.

L'abscisse $o'''p'''$ est égale à la projection de la ligne brisée $op'P'$ ou à $op' \cos \gamma + p'P' \sin \gamma$.

On a donc les relations

$$y = r \sin \alpha, \tag{13}$$

$$x = r \cos \alpha \cos \gamma + Y \sin \gamma. \tag{14}$$

que l'on peut mettre sous la forme

$$\alpha = \text{arc sin } \frac{y}{r}, \tag{15}$$

$$Y = \frac{1}{\sin \gamma}\left(x - \cos \gamma \sqrt{r^2 - y^2}\right). \tag{16}$$

Transportant ces valeurs de α et y dans l'équation (3), on en déduit :

$$\frac{1}{\sin^2\gamma}\left(x-\cos\gamma\sqrt{r^2-y^2}\right)^2+\left(e+\pi r-r\arc\sin\frac{y}{r}\right)^2=R^2. \quad (17)$$

Telle est l'équation qu'il s'agissait de déterminer.

B. *Cas d'une section droite quelconque.* — Si, au lieu d'attribuer à la voûte une section droite circulaire, on lui suppose une autre forme et si on désigne par s l'arc détaché à partir du point C' sur cette section par une génératrice quelconque $Pp, P'\pi$, en conservant d'ailleurs les autres notations précédemment admises, l'équation générale de la transformée d'un lit dans le développement est :

$$Y^2+(e+s)^2=R^2. \quad (18)$$

Celle de sa projection sur le plan des naissances s'obtient en remplaçant dans cette dernière s par sa valeur en fonction de x qui suffit à déterminer cette variable et peut se mettre sous la forme :

$$y^2+f(x)=R^2. \quad (19)$$

Celle de sa projection sur le plan vertical diamétral est de même :

$$y^2+\varphi(x)=R^2. \quad (20)$$

Le théorème des foyers s'applique encore aux normales à ces projections ; pour une génératrice ξ, ces foyers ont respectivement pour abscisses sur les deux plans de projection :

$$\xi-\frac{1}{2}f'(\xi),$$

$$\xi-\frac{1}{2}\varphi'(\xi)\ (*).$$

(*) Le théorème des foyers est également vrai pour l'appareil orthogonal convergent, attendu que les équations des projections des lignes d'assises de cet appareil ont une forme semblable à celle des équations (19) et (20).

§ 2. — Démonstration géométrique des propriétés focales.

Démonstration générale du théorème des foyers. — Les propriétés focales que nous avons énoncées, sans entrer dans le détail de leur démonstration analytique, peuvent facilement s'établir par la géométrie pure.

Prenons en effet la génératrice dont le développement serait Pp (Pl. 25, *fig.* 2), et sur cette génératrice :

— le point p qui en forme le pied sur la section droite limitant la zone appareillée en biais ;

— un point quelconque P.

Le plan π tangent au cylindre de douelle le long de la génératrice Pp contient nécessairement les tangentes à toutes les lignes de lits, au point où ces lignes coupent Pp.

Les plans normaux à ces tangentes ou aux courbes de lits sont donc perpendiculaires à ce plan et se coupent entre eux suivant des normales audit plan ou des parallèles à la normale op à la section droite au point p (c'est-à-dire au rayon op dans l'espèce d'une section droite circulaire).

Le plan normal QR au point p n'est d'ailleurs autre que celui de la section droite.

Le plan normal QS au point P fait avec ce dernier un angle égal à celui de la génératrice avec la ligne de lit qui passe par ce point, c'est-à-dire à l'angle PEN du développement de la douelle.

Cela posé, considérons le triangle rectangle dessiné sur le plan tangent par le segment Pp de la génératrice et par les traces des deux plans normaux ; l'angle de ces deux traces est précisément celui des deux plans. Le triangle considéré a donc un côté de son angle droit et l'angle aigu opposé égaux aux éléments homologues du triangle PpE du développement ; il est donc égal à ce triangle.

Le côté correspondant à la trace de la section droite est en conséquence égal à Ep et par suite indépendant du point P ; l'intersection des deux plans normaux est dès lors

elle-même indépendante de la position de ce point et partant *elle est commune à tous les plans normaux.*

Les normales aux projections des lignes de lits *sur un plan quelconque parallèle aux génératrices* n'étant autre chose que les projections des traces des plans normaux à ces lignes sur un plan parallèle au plan de projection mené par cette génératrice concourent donc vers un foyer unique qui est la projection de la trace de l'intersection commune à tous ces plans sur le plan parallèle au plan de projection.

Position des foyers dans les projections sur les plans diamétraux des naissances et de la clef. — La plus courte distance entre l'intersection des plans normaux et la génératrice est d'ailleurs mesurée par la droite Ep et a ainsi pour expression $e + \pi r - r\alpha$ dans le cas particulier d'une section droite circulaire.

Si donc sur le plan de section droite rabattu (Pl. 25, *fig.* 1), on mène au point π une tangente à l'arc de section droite, si on prend ensuite sur cette tangente une longueur $\pi e = pe$, si enfin par le point e ainsi obtenu on mène une parallèle à $o\pi$, cette droite ef représentera l'intersection commune à tous les plans normaux.

La droite ef coupera la trace du plan parallèle au plan des naissances mené par la génératrice Pp au point f qu'il suffira de projeter en F pour avoir le foyer cherché dans la projection sur la douelle. Or on a, au cas de la section droite circulaire,

$$\text{F}p' = f\pi = \frac{\pi e}{\sin \pi f e} = \frac{e + \pi r - r\alpha}{\sin \alpha}; \qquad (21)$$

$$\text{donc } (-o\text{F}) \text{ ou } x = r \cos \alpha - \frac{e + \pi r - r\alpha}{\sin \alpha}. \qquad (22)$$

On arriverait de même à la formule correspondant au plan diamétral vertical.

Ainsi sont établis géométriquement es théorèmes géné-

raux et les formules spéciales à la section droite circulaire que nous avions énoncés au § 1er du présent chapitre.

Nous ne croyons pas devoir développer davantage ces calculs analytiques et ces considérations théoriques, afin de ne pas sortir du cadre restreint et pratique que nous nous sommes imposé.

Nous allons donc terminer la présente note par le compte rendu de l'application que nous avons faite de l'appareil circulaire convergent.

DEUXIÈME PARTIE.

APPLICATION DE L'APPAREIL CIRCULAIRE CONVERGENT AU PONT SOUTERRAIN DES KŒURS.

CHAPITRE IV.

DISPOSITIONS GÉNÉRALES DE L'OUVRAGE ET NATURE DES MATÉRIAUX EMPLOYÉS A SA CONSTRUCTION.

Situation et destination de l'ouvrage. — L'ouvrage auquel nous avons appliqué l'appareil circulaire convergent est situé dans un col rocheux de l'étage du coral-rag, près des villages des Kœurs, département de la Meuse, arrondissement de Commercy (voir le plan général au $\frac{1}{500}$, Pl. 25, *fig.* 3).

Il est destiné au passage du canal de l'Est (branche de la Meuse) :

1° Sous le chemin de fer de Lérouville à Sedan, qui est lui-même sur ce point en tranchée de 3 mètres de profondeur;

2° Sous la route nationale n° 64 de Neufchateau à Mézières, qui est au contraire en remblai de 2 mètres de hauteur;

3° Au travers d'un gradin calcaire qui sépare ces deux voies de communication et au droit duquel on a continué la voûte, afin de ne pas s'imposer les sujétions des deux têtes supplémentaires qu'aurait rendues nécessaires la division de l'ouvrage.

Dispositions et dimensions générales de l'ouvrage. — Sa longueur est de 50 mètres (voir Pl. 25, *fig.* 3, et Pl. 26, *fig.* 1, 3 et 4).

Il est biais à 52°30′.

Sa section droite est en plein cintre de 10 mètres d'ouverture, savoir :

	mètres.
Banquettes de halage et de contre-halage de 1m,965 chacune, ensemble 3m,93, ci.	3,93
Largeur de la cuvette du canal au niveau de ces banquettes	6,00
Fruit des pieds-droits en contrebas des naissances (ces pieds-droits ont 0m,50 de hauteur et leur parement prolonge le cintre de la voûte).	0,07
Total pareil.	10,00

La cuvette du canal a une profondeur de 3m,25, savoir :

	mètres.
Mouillage.	2,75 (*)
Relief des banquettes de halage et de contre-halage au-dessus du plan de la retenue normale.	0,50
Total pareil.	3,25

La hauteur totale de la clef de voûte à l'intrados au-dessus du radier de la cuvette est de 8m,75.

Les murs de cuvette ont un fruit de 0m,25 chacun.

(*) Le mouillage normal du bief n'est que de 2m,20; mais il a été porté à 2m,75 sous le pont, pour compenser dans une certaine mesure les difficultés que la réduction de la largeur de la cuvette eût apportées, sans cette précaution, à la circulation des bateaux. Une rigole spéciale de vidange a d'ailleurs été ménagée pour permettre d'assécher, le cas échéant, le radier de l'ouvrage.

Exécution, partie à ciel ouvert, partie en souterrain. — L'arche a été faite :

a — *à ciel ouvert* : 1° au droit du chemin de fer dont le niveau ne se prêtait pas à un autre mode d'exécution (*) et qui a été dévié provisoirement à droite, c'est-à-dire vers la vallée, sur un massif de rocher réservé pour n'être déblayé qu'ultérieurement. (Voir Pl. 25, *fig.* 3);

2° au droit du gradin dont la roche ne paraissait pas offrir des garanties suffisantes pour être attaquée en galerie ;

3° enfin dans la zone biaise de la tête d'aval dont l'exécution n'aurait pu être correcte autrement.

b — *en souterrain*, sous la route, dans la région voisine du chemin de fer de la Meuse, de manière à éviter l'établissement d'un pont provisoire pour le maintien de la circulation sur cette voie de communication pendant la construction de l'ouvrage.

Épaisseur et profil de l'extrados de la voûte. — La voûte a une épaisseur de $0^m,80$ à la clef, elle est extradossée comme le montre la *fig.* 5, Pl. 26 ; elle est solidement assise sur le rocher un peu en contrebas du niveau des joints de rupture (**).

Elle porte une chape qui est formée d'une couche de béton fin et d'un enduit en asphalte (***), et qui est mise

(*) La crête des rails est à $0^m,60$ au-dessus de la chape de la voûte.

(**) D'après les dispositions prescrites à l'entrepreneur, l'exécution en souterrain devait s'étendre non seulement sous la route nationale, mais encore sous le gradin situé entre cette route et le chemin de fer; la partie de la voûte faite de cette manière ne devait comporter qu'un revêtement d'une épaisseur uniforme de $0^m,50$. Mais, en fait, la dislocation du terrain a conduit à limiter, comme il a été dit ci-dessus, l'ouverture du souterrain et dès lors il a paru préférable d'adopter un profil unique.

(***) Eu égard à leur élasticité, les chapes en asphalte résistent mieux que les chapes en ciment sous les voies ferrées.

en communication avec des descentes d'eau et des aqueducs sous halage débouchant dans la cuvette.

Les bandeaux de tête sont extradossés parallèlement et ont $0^m,80$ de hauteur.

Épaisseur des piédroits et des revêtements de la cuvette. — Les piédroits ont $0^m,50$ d'épaisseur et reposent chacun sur un cours de libages.

Les parois rocheuses de la cuvette étant fissurées et perméables sont pourvues d'un revêtement maçonné de $0^m,35$ d'épaisseur énergiquement relié au rocher par de nombreux arrachements.

Ce revêtement étant exposé à des venues d'eaux extérieures qui pourraient tendre à le renverser en cas de vidange du bief, est muni à $0^m,30$ au-dessus du plafond de clapets en fonte.

Le plafond de la cuvette est également revêtu d'un radier maçonné de $0^m,30$ d'épaisseur.

Division de la voûte en zones. — Les zones biaises des têtes ont chacune $8^m,664$ de longueur sur l'axe; elles sont appareillées dans le système circulaire convergent avec crémaillères aux joints de rupture.

Le corps droit a $32^m,672$.

Nature des matériaux et des mortiers. — Les archivoltes de la voûte, les crémaillères, les parapets et les corniches qui couronnent les tympans sont en pierre de taille calcaire de Lérouville. Il en est de même des couronnements des murs de cuvettes.

Le surplus a été fait, pour les parements, en moellons smillés et, pour les massifs, en moellons bruts de même provenance.

Les conditions dans lesquelles ont été organisés les chantiers de déblai du rocher — le délai considérable qu'a exigé ce déblai — enfin la nécessité de réduire au strict minimum la durée de la circulation des trains sur la voie provisoire, dont les pentes et les courbes rendaient l'exploitation fort

pénible, ont obligé les ingénieurs à exécuter une partie de la voûte en plein hiver. On a pour ce motif employé exclusivement du mortier de Portland (marque Demarle et Lonquety de Boulogne), composé de 1 partie de ciment pour 2 de sable, dans la zone biaise de la tête amont. Il en a été de même pour l'archivolte de la tête aval. Mais le surplus des maçonneries de la voûte a été fait en mortier bâtard composé en volume de $0^{mc},90$ de sable pour $0^{mc},35$ de chaux hydraulique en pâte de Ville-sous-la-Ferté (usine Convert et Maugras) et $0^{mc},10$ (150 kilog. environ) de ciment de Portland.

Dispositions de l'appareil. — Les dispositions de l'appareil sont suffisamment indiquées par les dessins (Pl. 26) pour qu'il soit inutile de les décrire en détail.

Nous nous bornerons à faire remarquer :

— que les moellons de douelle ont de $0^{m},215$ à $0^{m},225$ de largeur, joints compris;

— que les voussoirs de tête en pierre de taille correspondent généralement à deux assises de moellons;

— que toutefois on a dû, du côté de l'angle aigu, faire correspondre le premier voussoir de la partie biaise à quatre assises de moellons et le tailler, vers l'intérieur de la voûte, en crémaillère à quatre échelons dont le dernier fait suite à la rangée de crossettes du joint de rupture, d'une part, afin de donner à ce voussoir une longueur suffisante, et d'autre part, afin d'éviter de l'affaiblir comme ou aurait été conduit à le faire pour y engager la première crossette s'il n'avait correspondu qu'à trois assises de moellons;

— que les six premiers voussoirs de tête à partir de la naissance, du côté de l'angle aigu, ont été prolongés au delà des bandeaux de tête pour former crossette dans les tympans de manière à comporter plus d'étendue dans leurs lits qui, sans cette précaution, n'auraient pas eu une assiette suffisante;

— enfin que, du côté de l'angle obtus, le premier vous-

soir de la partie biaise a sur le plan de tête une largeur double de celle des autres voussoirs et présente par suite en son milieu un joint simulé.

CHAPITRE V.

MODE D'EXÉCUTION DES OUVRAGES.

---

§ 1er. — Ordre d'exécution. — Cintres. — Tracé des lignes d'assises sur ces cintres.

Ordre d'exécution. — On a tout d'abord effectué à peu près en totalité le déblai de la tranchée, pour ne pas compromettre ultérieurement les maçonneries en donnant un grand nombre de coups de mine par-dessous ou à proximité.

Puis on a maçonné les piédroits et la voûte jusqu'aux joints de rupture.

Enfin on a mis les cintres en place et exécuté la partie supérieure de la voûte, mais en la construisant successivement par tiers, afin d'économiser le bois.

On a naturellement commencé par la partie correspondant au chemin de fer qui était la plus urgente.

Cintres. — La Pl. 26, *fig.* 5, 6 et 7, donne la structure des fermes de tête, celle des fermes droites, ainsi que la distribution des fermes des zones biaises qui convergeaient vers l'arête d'intersection des plans limitant ces zones.

Ces fermes ne reposaient chacune que sur deux appuis distants de 8m,75 en section droite; on n'avait pas pris de points d'appui intermédiaires, parce qu'on voulait ménager sous les cintres le passage des wagons de terrassements qui transportaient à l'amont du souterrain les déblais d'une grande tranchée située en aval de l'ouvrage.

Les fermes de tête ont été solidement contrebutées du côté des angles obtus, de manière à bien résister au déver-

sement qui tend à s'y produire vers l'extérieur au moment de la pose des voussoirs (voir le Mémoire de M. l'inspecteur général Graëff, pages 124 et 125).

Les couchis ont été recouverts d'un voligeage formé de feuillets de sapin dirigés suivant les sections droites et constituant une surface parfaitement réglée et dressée.

Tous les bois étaient d'essence de sapin.

Tracé des lignes de lits des zones biaises sur les cintres. — Une fois les cintres bien simblottés et vérifiés, on a procédé à la division des courbes de tête et au tracé des lignes d'assises ou de lits des zones biaises.

Ce tracé s'est fait :

— en dessinant sur le voligeage les génératrices d'assises du corps droit de la voûte sur une certaine étendue, contre chacune des zones biaises;

— en prolongeant ces génératrices sur lesdites zones;

— en y rapportant ensuite les traces des lits, d'après une épure au $\frac{1}{10}$ préparée par avance avec un soin extrême, et en indiquant ces traces par des pointes;

— en joignant les pieds de ces pointes par des traits continus au moyen d'une règle méplate bien flexible posée à plat entre les extrémités des hélices, pour la région de tête appareillée dans le système héliçoïdal, et posée au contraire de champ, de manière à toucher au moins trois ou quatre pointes à la fois, pour la région appareillée dans le système circulaire;

— enfin en rendant ces traits apparents à l'aide d'une rainette et par l'application d'une couche de minium.

Tracé des lignes de joints d'arrière des voussoirs de tête sur le cintre. — On a complété le tracé des panneaux de douelle des voussoirs :

— en portant sur leurs lignes d'assises les longueurs qui leur avaient été assignées;

— puis en dessinant à l'aide d'une équerre la trace du

joint d'arrière et en rendant ce joint bien apparent par le procédé ci-dessus indiqué.

Tracé des crémaillères sur le cintre. — Quant aux crémaillères, leurs lignes d'assises étaient données : d'une part, à leur base, par une génératrice du cylindre d'intrados ; et d'autre part, à leur sommet, par la ligne de lit du cours voisin de moellons de la zone biaise.

Les joints se traçaient au moyen d'une équerre.

§ 2. — Taille des voussoirs et crémaillères.

Modèle au $\frac{1}{10}$. — Nous avons, avant l'exécution, fait préparer, conformément à la sage recommandation contenue dans le mémoire de M. l'inspecteur général Graëff (p. 117), un modèle en pierre tendre à l'échelle de $\frac{1}{10}$ de l'une des zones biaises avec voussoirs de tête complétement taillés.

Ce modèle a été fort utile en permettant de corriger, notamment pour les voussoirs formant crémaillères, des imperfections que l'épure n'avait pas révélées.

Il a servi en outre de base à la commande des pierres qui devaient former l'archivolte et les crémaillères et à leur ébauchage. La commande a été faite :

1° pour les voussoirs, en prenant comme base le plus fort des deux lits et l'épaisseur maximum ;

2° pour les crémaillères, d'après la douelle, en attribuant à la pierre une épaisseur de $0^m,60$ et en ayant soin de tenir l'extrados plus fort que l'intrados.

A. *Voussoirs de tête de la partie biaise. — Tracé des lignes de joints des voussoirs dans le plan de tête.* — L'achèvement de la taille s'est fait au moyen de panneaux ou d'angles relevés sur le cintre lui-même.

A cet effet, on a tout d'abord tracé sur l'épure plane au $\frac{1}{10}$ de l'élévation de chacun des bandeaux de tête et au-dessus de l'extrados une ligne droite jusqu'à laquelle ont été prolongés les oints des voussoirs de ce bandeau et

on a mesuré avec précision les longueurs des segments ainsi détachés sur cette ligne auxiliaire.

Puis on a fait disposer au-dessus des fermes extrêmes du cintre et dans le plan des têtes un cadre rigide en bois occupant exactement la position qui avait été assignée à cette droite; on y a rapporté les divisions de l'épure et on les a jointes aux divisions correspondantes de la courbe de tête par des fils de fer fixés à des pitons; chacun de ces fils a donné la direction des joints de tête que l'on a eu soin d'ailleurs de vérifier au moyen d'une équerre.

Cette opération préliminaire terminée, nous avons employé successivement et à titre comparatif diverses méthodes de taille.

D'après cette expérience et celle de plusieurs autres ponts biais de notre service, les deux procédés les meilleurs nous paraissent être ceux que nous allons décrire. Dans l'un et l'autre d'ailleurs, il y a lieu d'admettre, comme on le fait presque toujours aujourd'hui en pratique, que les lits de pose et d'attente diffèrent très-peu d'un plan et peuvent y être assimilés.

1er *Procédé. — Mesures diverses sur les cintres.* — Pour l'application du premier procédé (*), on commence par mesurer sur le cintre, au moyen d'une équerre articulée à deux branches :

1° l'angle BAT formé dans le lit de pose par la ligne BA du joint de tête et la tangente AT à la ligne d'assise de douelle (voir Pl. 26, *fig.* 8);

2° l'angle analogue CDT' dans le lit d'attente;

3° les deux angles EAD et ADF formés respectivement dans la douelle par la courbe de tête et les deux lignes d'assises.

(*) Ce premier procédé est à très-peu près celui qu'enseignait feu M. Morandière, dans son cours de construction des ponts à l'École des ponts et chaussées.

On relève en outre :

1° au moment du mesurage de l'angle BAT, la distance TI de l'extrémité de l'équerre à la courbe AE ;

2° lors du mesurage de l'angle CDT', la distance analogue ;

3° enfin, la distance DK à laquelle la génératrice d'intrados passant au point A coupe la ligne d'assise DF.

Établissement des panneaux. — On a dès lors tous les éléments nécessaires pour établir les panneaux.

Celui du plan de tête se prépare d'après les cotes de l'épure au $\frac{1}{10}$ et s'achève sur le cintre.

Celui du lit de pose est découpé d'après les longueurs BA et AE, l'angle BAT et la distance TI qui suffit pour déterminer assez exactement la courbure de la ligne d'assise AE, en assimilant cette ligne à un arc de cercle et en la traçant avec une règle flexible.

Il en est de même de celui du lit d'attente.

Celui de la douelle est profilé d'après les longueurs AD, AE, DF et les angles des lignes d'assises avec la courbe de tête ; il n'est d'ailleurs pas indispensable et n'est utilisé que comme moyen de vérification.

Tous ces panneaux sont soigneusement présentés et vérifiés sur le cintre avant leur emploi.

Taille des voussoirs. — Une fois les panneaux prêts, on commence par tailler le lit de pose ; on y applique le panneau ABGE et on en reporte les lignes EA et AB sur la pierre.

On mesure ensuite sur le cintre l'angle dièdre du plan de pose et du plan de tête, en se servant à cet effet de l'équerre articulée à deux branches et en ayant soin d'en diriger les deux côtés normalement à l'arête d'intersection AB, ce qui est toujours facile au moyen d'une équerre auxiliaire à angle droit.

En adaptant cet angle à la pierre, on taille la face ABCD du voussoir sur laquelle on reporte le panneau correspondant.

Puis on passe par le même procédé au lit d'attente sur lequel on trace les lignes FD et CD.

On dresse ensuite la douelle au moyen d'une règle droite, que l'on fait mouvoir parallèlement à la génératrice AK, et on en vérifie le tracé par l'application du panneau.

Cela fait, on ébauche le joint postérieur normalement à l'intrados; toutefois pour les voussoirs dont l'angle aigu est prononcé, il est bon de couper ce joint vers le milieu de sa hauteur par un ressaut à peu près parallèle au plan de tête, ou mieux à la douelle, afin d'éviter un démaigrissement exagéré de la pierre à l'extrados.

Enfin on ébauche de même l'extrados :

1° pour les voussoirs à angle aigu, parallèlement à l'intrados ;

2° pour les voussoirs à angle obtus :

a — à la partie antérieure, normalement au plan de tête, dans le double but d'y éviter un angle aigu et de préparer l'assiette du tympan ;

b — à la partie postérieure, parallèlement à la douelle.

2e *Procédé.* — *Mesures sur le cintre.* — Pour l'application du deuxième procédé, on mesure de même sur le cintre :

1° au moyen d'une équerre plane articulée à deux branches, comme il a été dit ci-dessus, les angles des lignes d'assises avec les joints et la courbe de tête ainsi que la courbure de ces lignes ;

2° au moyen d'une équerre spéciale à trois branches, dont deux fixes et formant un angle de 90°, et la troisième mobile autour d'un genou ayant son centre au point d'intersection des deux premières (*), les deux angles trièdres dessinés par la courbe de tête avec les lignes d'assises et les lignes de joints de tête concourant à chacune de ses extrémités.

(*) Cette équerre a été faite spécialement pour l'usage auquel elle est employée; le dessin en est donné à la Pl. 26, *fig.* 9.

Établissement des panneaux. — Les panneaux s'établissent comme dans le premier procédé.

Taille des voussoirs. — On commence ensuite par tailler le lit de pose avec le panneau B A E.

On passe au plan de tête au moyen de l'angle trièdre $\widehat{EA.BA,DA}$ et du panneau ABCD.

Puis on dresse le lit d'attente à l'aide de l'angle trièdre $\widehat{AD,FD,CD}$ et du panneau CDF.

Enfin on achève la douelle, le joint postérieur et l'extrados, ainsi qu'il a été dit ci-dessus.

Comparaison des deux procédés. — Les deux procédés qui viennent d'être indiqués donnent tous deux des résultats satisfaisants.

Le second, qui n'avait pas encore été appliqué à notre connaissance, nous paraît à la fois simple et sûr.

B. *Crémaillères.* — En ce qui concerne les crémaillères, on se borne à relever le panneau de douelle sur le cintre, puis on procède comme il suit à la taille.

On dresse le lit de pose, qui se termine à sa partie inférieure par une génératrice du cylindre d'intrados.

On passe de là à la douelle à laquelle on donne la courbure voulue au moyen d'une cerce formant l'une des branches d'une équerre dont l'autre représente le rayon de la section droite et glisse sur le lit de pose en restant normale à la génératrice de base.

On applique le panneau sur la surface ainsi dressée.

Enfin on taille les autres joints normalement à la douelle, et l'extrados parallèlement à l'intrados.

C. *Voussoirs spéciaux des joints de rupture.* — Pour les voussoirs spéciaux terminant la zone appareillée en biais au niveau des joints de rupture, on relève sur le cintre :

— les éléments du panneau de douelle,

— et l'angle de la génératrice formant ligne d'assise inférieure avec la ligne de joint de tête correspondante.

On établit le panneau du lit de pose, celui de la douelle et celui de la tête.

Puis on procède à la taille :

— en dressant le lit de pose et y reportant son panneau ;

— en passant du lit à la douelle au moyen de la cerce décrite à propos des crémaillères ;

— en déterminant ensuite le plan de tête au moyen de la courbe d'intrados fournie par le panneau de douelle et de sa ligne de joint inférieure ;

— en dressant le lit d'attente par sa ligne d'assise que donne la douelle et par le joint du plan de tête ;

— enfin en ébauchant le joint postérieur normalement à la douelle et l'extrados comme il a été expliqué pour les autres voussoirs.

On peut, à titre de vérification, établir un panneau pour le lit d'attente, bien que cela ne soit pas nécessaire.

D. *Voussoirs de tête en contre-bas des joints de rupture.* — Les voussoirs de tête en contre-bas des joints de rupture se préparent absolument comme les précédents.

Tous les voussoirs sont d'ailleurs présentés et rectifiés s'il y a lieu avant la pose définitive.

E. *Retaille de l'extrados d'une partie des voussoirs de tête pour l'assiette des tympans.* — Après l'achèvement de la voûte, on est obligé de retailler l'extrados des voussoirs du côté de l'angle aigu, au moins sur une partie de leur longueur, suivant un plan ou une série de plans normaux à la tête et disposés en échelons, afin d'éviter la poussée au vide à laquelle les tympans seraient soumis sous l'action de leur poids et de la charge des remblais.

Il est visible en effet que ces tympans reposeraient sur un plan incliné vers l'extérieur, si l'on n'avait soin d'y pourvoir par la recoupe que nous venons d'indiquer.

Du côté de l'angle obtus, le mouvement tendrait à se produire en sens inverse, c'est-à-dire vers l'extérieur de la voûte si l'extrados était dans toute son étendue parallèle à

l'intrados; cette tendance serait, il est vrai, combattue par la pression des remblais après l'achèvement de l'ouvrage; mais il n'en est pas moins nécessaire de donner aux tympans une assiette normale au plan de tête pour assurer leur stabilité pendant leur construction; c'est ce que nous avons indiqué précédemment en traitant de la taille des voussoirs.

F — *Moellons de douelle.* Les moellons de douelle ont été, même pour la zone biaise, préparés comme ceux d'un parement plan; la seule précaution que l'on ait prise a été de leur donner une longueur maximum de $0^m,30$ à $0^m,40$ suivant leur inclinaison sur les génératrices, de telle sorte que dans leur étendue on pût confondre le cylindre d'intrados avec son plan tangent.

§ 3. — Voussure ou corne de vache.

Nécessité de la voussure. Sa nature. — L'angle aigu de chacune des têtes a dû être abattu après coup; il était en effet trop fermé pour être conservé sans inconvénient.

La voussure employée à cet effet est la surface engendrée par une droite horizontale glissant :

— d'une part, sur une ellipse de tête ayant pour petit axe celui de l'ellipse primitive, mais comportant pour son grand axe une longueur supérieure de $0^m,30$ à celle du grand axe de cette dernière ellipse;

— d'autre part, sur l'ellipse obtenue en coupant le cylindre d'intrados par un plan vertical passant au sommet de l'ellipse de tête et rencontrant la génératrice des naissances à $0^m,15$ du sommet de l'angle aigu primitif.

Taille de la voussure. — L'ellipse directrice de tête est dessinée par points d'après l'épure au $\frac{1}{10}$, au moyen des longueurs des segments inférieurs qu'elle détache sur les lignes de joints des voussoirs.

L'ellipse directrice de douelle est de même dessinée par

points au moyen des longueurs des segments qu'elle détache sur les lignes d'assises.

On effectue ensuite la taille :

1° Soit d'après la génération théorique, au moyen d'un niveau de maçon renversé dont la branche supérieure représente la génératrice;

2° Soit au moyen d'une simple règle, en substituant à la génération théorique celle d'une droite assujettie à rencontrer les lignes de joints et d'assises à leurs points d'intersection avec les ellipses directrices.

Ces deux procédés donnent en pratique des résultats peu différents, tant au point de vue de la largeur et de la forme de la voussure qu'à celui de la facilité d'exécution.

Observations sur les dimensions des voussoirs à recouper. — Il faut d'ailleurs attribuer aux voussoirs à recouper un excédant de queue et de hauteur déterminé sur l'épure au $\frac{1}{10}$ de telle sorte qu'après la taille de la corne de vache ils présentent, tant en tête qu'en douelle, les mêmes dimensions que ceux de l'autre moitié de la voûte.

§ 4. — Précautions contre les mouvements pendant l'exécution et réultats du décintrement.

Précautions contre les mouvements. — Pendant la construction de l'arche, les mouvements suivants devaient tendre à se produire.

Du côté de l'angle obtus, le cintre était poussé au vide; les voussoirs de tête au contraire étaient poussés vers l'intérieur de la voûte; il y avait là en effet deux plans inclinés sollicités à glisser l'un sur l'autre.

Du côté de l'angle aigu, la situation était inverse; elle n'était d'ailleurs à redouter que pour les voussoirs, attendu que le cintre ne pouvait céder eu égard à sa grande longueur.

Les précautions prises pour empêcher ces mouvements ont consisté :

1° à moiser très-solidement les fermes du cintre et à en assurer ainsi la parfaite solidarité;

2° à étançonner la ferme de tête contre le rocher (comme nous l'avons dit page 359), du côté de l'angle obtus, par des étais qui ont été enlevés au moment du décintrement;

3° à étayer également les voussoirs de l'angle aigu;

4° à pousser rapidement la maçonnerie en arrière de la tête, vers l'angle obtus.

Après l'achèvement de l'arche, les voussoirs de l'angle obtus devaient tendre à être chassés vers l'extérieur; il suffit, pour le comprendre, de remarquer, à défaut d'autres considérations, que le voussoir spécial terminant la zone biaise au niveau du joint de rupture présente la forme d'un coin dont la base la plus large est dans le plan de tête (*).

On y a pourvu:

1° en reliant ce dernier voussoir au rocher formant culée derrière les piédroits par un tirant horizontal en fer de $\frac{0^m,03}{0,03}$ d'équarrissage et des crampons barbelés de mêmes dimensions;

2° en pratiquant d'ailleurs sur les faces de lit de tous les voussoirs de tête des rainures dans lesquelles le mortier s'est introduit et a formé de véritables tenons rattachant énergiquement ces voussoirs les uns aux autres.

Grâce à ces mesures de prudence, on a pu éviter *complétement* les mouvements ci-dessus indiqués, qui sont bien connus de tous les ingénieurs ayant eu des arches biaises à établir. (Voir le Mémoire précité de M. l'inspecteur général Graëff, pages 124 et suivantes et le Cours de stéréotomie de M. l'inspecteur général de la Gournerie à l'École polytechnique, année 1863, page 119.)

(*) Les pressions tendent d'ailleurs toujours à briser le voussoir du joint de rupture du côté de l'angle obtus; les accidents de cette nature sont fréquents et peuvent s'observer dans un grand nombre de ponts biais.

Résultats du décintrement. — Le décintrement a eu lieu :

1° pour la partie faite en mortier de ciment pur, huit jours après la fermeture;

2° pour le surplus, de quinze jours à 3 semaines après le clavage.

Le tassement à la clef a été absolument inappréciable, malgré tous les soins apportés à sa constatation.

CONCLUSIONS.

Tels sont les renseignements qu'il nous paraît utile de donner sur l'appareil circulaire convergent et sur son application au pont souterrain des Kœurs.

Cet ouvrage a été exécuté avec soin par MM. Moreau et Dollot, entrepreneurs, sous l'intelligente direction de MM. Morel et Plicy, conducteurs des ponts et chaussées.

Nancy, le 4 janvier 1879.

N° 63

NOTICE

SUR

LES SOUTERRAINS A VOIE UNIQUE

DU

CHEMIN DE FER DE MENDE A SÉVÉRAC

(PREMIER ARRONDISSEMENT)

Par M. SÉJOURNÉ, ingénieur des ponts et chaussées.

TYPES ADOPTÉS — PRIX DE PERCEMENT

ET

COMPARAISON AVEC LES TYPES ADMIS PAR LES COMPAGNIES.

Le premier arrondissement du chemin de fer de Mende à Sévérac comprend quatre souterrains à une voie, dont les projets ont été approuvés par les décisions ministérielles des 31 octobre 1877, 17 avril et 31 mai 1878; trois d'entre eux sont en cours d'exécution.

Nous croyons utile de faire connaître la méthode qui a été suivie pour en établir le prix de percement et qui a été pleinement justifiée par les rabais des adjudications ; les formules pratiques auxquelles elle conduit pourront être appliquées à des estimations de projets définitifs.

Indiquons d'abord les dispositions adoptées pour les sections transversales des souterrains.

Définition de l'intrados (Pl. 27, *fig.* 1).

Il se compose d'une demi-ellipse surhaussée de 4 mètres de montée et de 5 mètres d'ouverture, se continuant par

deux arcs de cercle tangents à cette courbe aux extrémités de son petit axe, et coupant l'horizontale du niveau des rails à $2^{m},25$ de l'axe de la voie; les naissances de la voûte sont à 2 mètres au-dessus du niveau des rails.

La hauteur libre sous clef est donc de 6 mètres, la largeur entre piédroits au niveau des rails de $4^{m},50$, la largeur au niveau des naissances de 5 mètres, et on vérifie facilement que la distance verticale entre l'intrados et le bord du rail extérieur est de $5^{m},798$.

Ces différentes dimensions se justifient comme suit :

Hauteur de 6 mètres sous clef. — Il suffirait, pour remplir rigoureusement la dernière condition prescrite par l'article 16 du cahier des charges, — ménager entre le rail extérieur et l'intrados une hauteur libre de $4^{m},80$, — d'une hauteur sous clef de $4^{m},949$, soit 5 mètres. La hauteur de 6 mètres a été fixée par la décision ministérielle du 14 janvier 1875, relative aux travaux préparatoires des souterrains des Achatis et de la Rouvière (4e lot), laquelle prescrit d'établir les galeries de reconnaissance en vue d'une hauteur sous cléf de 6 mètres, que les souterrains soient à voie unique ou à deux vöies.

Toutes les compagnies ont adopté une hauteur sous clef inférieure à 6 mètres.

La Cie P. L. M. admet	. . . .	$5^{m},50$.
La Cie d'Orléans.	Ligne d'Arvant au Lot — sauf dans la partie comprise entre Massiac et Murat où elle a été réduite à $5^{m},20$, elle a été portée à $5^{m},50$, en raison de la hauteur exceptionnelle des machines spéciales affectées à la traversée du Cantal (*).	
	Ligne de Brive à Tulle.	$5^{m},20$.
La Cie du Midi (ligne de Rodez à Montpellier).		$5^{m},00$.

(*) Voir le *Compte rendu statistique de la construction du tronçon de Vic-sur-Cère à Murat* de M. Nordling.

Largeur de $4^m,50$ au niveau des rails. — C'est la largeur prescrite par l'article 16 du cahier des charges. Sauf la Cie d'Orléans, qui, pour les souterrains de la ligne d'Arvant au Lot, l'a réduite à $4^m,32$, on a généralement adopté une largeur supérieure à $4^m,50$. La Cie P. L. M. (lignes d'Alais au Pouzin et de Brioude à Alais) a admis $4^m,70$; le Midi (ligne de Rodez à Montpellier), $4^m,75$. Ce supplément de largeur de 10 centimètres à $12^c,5$ de chaque côté de l'axe est insuffisant pour protéger les agents de la voie dans le cas où une portière serait ouverte ; leur sécurité est assurée par les niches de refuges prévues tous les 25 mètres.

Largeur de 5 mètres au niveau des naissances. — Cette largeur, supérieure à celle prescrite par le cahier des charges, est adoptée par toutes les Cies. Comme nous le verrons plus loin, elle assure le jeu dans les souterrains courbes et augmente la résistance des piédroits en donnant à leur parement intérieur un profil concave analogue au profil courbe adopté pour nos murs de soutènement.

Choix de la courbe d'intrados.

On admet souvent pour courbe d'intrados une anse de panier surhaussée à 3 centres. Cette définition ne présente d'autre avantage qu'un calcul plus rapide des développements des arcs. Pratiquement, les vaux des cintres et l'intrados de la section à déblayer se définissent par ordonnées et abscisses, et la demi-ellipse définie par une seule équation se prête plus facilement à cette détermination.

Les dimensions de l'intrados suffisent dans les courbes.

Le devers est donné par la formule $D = \frac{V^2 l}{Rg}$, dans laquelle V représente la vitesse en mètres par seconde ; l, l'écartement d'axe en axe des rails, soit $1^m,51$, et R le rayon de la courbe.

Pour $V = 14^m,029$ (soit 50 kilomètres à l'heure) et $R = 300$ mètres, on a $D = 0^m,10$.

Ce devers réduit l'espace libre entre l'arête supérieure des véhicules et le parement du souterrain d'une quantité $J = h\frac{D}{l}$, h désignant la hauteur des wagons pour laquelle la Cie du Midi admet $3^m,75$ (*). Pour une courbe de 300 mètres, on aura $J = 3,75 \times \frac{0,1}{1,51} = 0^m,248$. Or la demi-largeur du souterrain est pour cette hauteur $2^m,248$; la largeur du gabarit étant $3^m,20$, il reste une largeur libre de $2^m,248 - \frac{1}{2}\,3,20 = 0^m,648$, que le devers réduit à $0^m,40$, espace largement suffisant pour empêcher que le parement ne soit atteint, même dans le cas où le chargement serait déplacé ou le devers accidentellement exagéré (**).

Les dimensions adoptées permettent encore d'ouvrir la portière d'un train en marche, tout en tenant compte de la réduction de largeur due au devers. En effet, l'arête supérieure d'une portière est à $2^m,70$ au-dessus du rail, et la demi-largeur à ce niveau est $2^m,461$. Comptant pour la demi-largeur du wagon : 1° la demi-largeur du gabarit ($1^m,600$), 2° la largeur d'une portière ouverte ($0^m,600$), 3° le jeu $\frac{2,70 \times 0,1}{1,51} = 0,178$, soit en tout $2^m,378$. On voit qu'il reste un intervalle libre de $0^m,083$ (***).

(*) On remarquera que le gabarit du matériel roulant du Midi est plus haut que ceux des autres compagnies françaises. — Voir M. Couche, *Matériel roulant* (t. II, Pl. 10, *fig.* 17).

(**) Si l'on applique sans devers ce gabarit au type de souterrain adopté par la compagnie du Midi dans la ligne de Rodez à Montpellier, on trouve en alignement droit, une largeur libre de 0,383 seulement.

(***) On remarquera encore que sur une hauteur de $3^m,50$ environ, l'intervalle laissé libre entre les parois du souterrain et une normale menée par le rail à la surface des rails inclinée suivant le devers est supérieur à $1^m,35$, minimum admis par la compagnie

Ainsi, les dimensions données à la section d'intrados du souterrain assurent, avec un jeu suffisant, l'inscription du gabarit dans les courbes de 300 mètres et permettent d'ouvrir les portières d'un train en marche. Il n'y aura donc pas lieu, comme on le fait pour les souterrains à section réduite, d'en augmenter l'ouverture ni d'en déplacer l'axe.

Assèchement de la plate-forme.

L'assèchement de la plate-forme est assuré par l'aqueduc en maçonnerie de $\frac{30}{38}$ appuyé contre le piédroit placé du côté où les suintements sont le plus abondants (disposition adoptée dans les souterrains de la ligne de Brive à Tulle). Une pente de $0^m,043$, dont le sommet est à $0^m,45$ au-dessous de la ligne des rails, conduit l'eau dans les barbacanes de $\frac{20}{20}$ ménagées tous les 2 mètres dans les piédroits de l'aqueduc, dont le seuil est à 20 centimètres en contrebas du pied de la pente.

Avec ces dimensions, l'épaisseur minima du ballast au droit de l'extrémité d'une traverse de $2^m,75$ est $0^m,49$, et au droit du rail de $0^m,51$.

La section donnée à l'aqueduc suffit en général, même pour les souterrains à deux voies. Cependant, si les eaux étaient très-abondantes, il y aurait lieu d'exécuter deux aqueducs latéraux (lignes d'Alais au Pouzin et de Brioude à Alais). La plate-forme serait alors dérasée en dos d'âne avec deux pentes transversales.

Nos projets primitifs étaient conformes à ce dernier type; nous les modifions comme ci-dessus en cours d'exécution. Avec les bases que nous indiquerons plus loin, la différence des prix des deux systèmes est d'environ

---

P. L. M. pour la distance du rail aux obstacles isolés placés le long de la voie. (Voir l'*Instruction de la compagnie en date du* 21 *septembre* 1868).

13 francs par mètre courant. Dans tous les cas, on n'a pas à riper la voie pour visiter l'aqueduc, comme on doit le faire s'il est construit dans l'axe. Lorsque la nature du terrain commande l'exécution d'un radier courbe entre les piédroits, celle d'un aqueduc latéral nécessite une légère augmentation du cube à déblayer.

Des revêtements.

Les *fig.* 2, 3 et 4, Pl. 27, représentent les différents types adoptés.

Type avec revêtement de $0^m,40$ (*fig.* 3). — Nous ne décrirons que le type 1, qui est à peu près le seul que nous ayons appliqué.

L'extrados est défini par une demi-ellipse de $4^m,40$ de montée et $5^m,80$ d'ouverture (*). Il est appareillé suivant un parement extérieur suffisamment régulier pour assurer l'écoulement des eaux. Le vide entre l'extrados et la paroi du souterrain est rempli par des pierres sèches posées à plat sur la voûte et serrées au marteau. On prévoit au-dessus de l'extrados un supplément de cube à déblayer pour donner à cette chemise de pierres sèches une épaisseur minima de $0^m,10$; les eaux s'écoulent par des barbacanes situées à 1 mètre au-dessus de la ligne des naissances et inclinées suivant la normale à l'ellipse d'intrados, soit à $\frac{16}{100}$ environ. Aux abords des têtes, elles sont remplacées par des conduits verticaux, enduits de ciment, qui dirigent l'eau directement vers l'aqueduc; on évite ainsi, dans les parties vues des souterrains, les bavures que les barbacanes produisent sur les maçonneries des piédroits, et, pour les souterrains percés à de hautes alti-

(*) L'épaisseur du revêtement, comptée suivant la normale à l'ellipse d'intrados, n'est rigoureusement égale à $0^m,40$ qu'au sommet; mais la différence maxima entre l'ellipse d'extrados et la courbe parallèle à l'ellipse n'est que de quelques millimètres.

tudes, on réduit la formation des glaçons qui se produisent aux abords des têtes.

Au-dessus du joint situé à 1 mètre au-dessus des naissances, le revêtement est en moellons tétués à lits pleins, de $0^m,40$ de queue uniforme; au-dessous, il est exécuté à plein rocher et soigneusement relié avec les parois du souterrain par de la maçonnerie hourdée. Cette partie du revêtement n'est qu'un placage, et il n'y a pas lieu de l'appareiller en voûte, sauf quand il s'agira de reporter les pressions sur un radier, auquel cas les maçonneries devront être rigoureusement conduites en coupe sur toute l'épaisseur du revêtement.

L'épaisseur de $0^m,40$ convient à un simple muraillement. Si l'on craint des poussées, on le portera à $0^m,60$ (*fig.* 4) et à $0^m,80$ (*).

Le clavage de la voûte est fait, sur $0^m,50$ de part et d'autre de l'axe, en moellons tétués sur toute l'épaisseur du revêtement. Les piédroits agissant dans ce cas comme murs de soutènement, on appareille suivant une verticale leur parement intérieur, et on donne à leur base une pente de $\frac{10}{100}$.

Prix de percement des souterrains.

Nous n'aurons en vue, dans tout ce qui va suivre, que les souterrains à une voie ouverts dans la roche dure et attaqués seulement par les têtes.

Dans tous les souterrains du premier arrondissement de la ligne de Mende à Sévérac, on a ouvert sur l'axe, avant l'adjudication des travaux, une galerie de reconnaissance de $6^m,50$ à 7 mètres carrés, dont le ciel se confond avec l'extrados de la voûte à construire. Des attachements pris pendant l'exécution de ces galeries font connaître le prix II

(*) Dans le souterrain des Achatis, à la traversée d'une poche à kaolin, nous l'avons portée à un mètre.

du mètre cube déblayé en galerie. Nous connaissons d'ailleurs le prix P d'un mètre cube du même déblai exécuté à ciel ouvert.

Soit ϖ le prix du mètre cube de déblai pour l'ensemble de la section, et proposons-nous de déduire ϖ des valeurs connues de Π et de P.

Nous nous sommes servi des relations qui résultent des prix de percement de divers souterrains exécutés suivant la même méthode, spécialement de ceux des lignes de Carcassonne à Quillan et de Brive à Tulle.

Les divers renseignements (*) qui s'y rapportent sont résumés dans le tableau ci-après :

DÉSIGNATION des souterrains.		LONGUEUR.	PRIX du mètre cube de la galerie d'avancement. Π.	PRIX de revient du mètre cube de l'ensemble ϖ.	VALEUR du rapport $\frac{\varpi}{\Pi}$.	NATURE du terrain traversé.	OBSERVATIONS.
Ligne de Carcassonne à Quillan.	N° 1 . . .	175,00	43,50	21,70	0,498	Calcaire schistoïde du terrain dévonien (très-dur).	La section de la gale[rie] est de 6^{m2},50 et la ha[u]teur sous clef de 5^{m},[…]
	N° 2 . . .	205,00	27,50	14,00	0,509		
	N° 3 . . .	238,00	32,50	15,75	0,484	Calcaire du terrain tertiaire inférieur.	
	N° 4 . . .	231,00	30,00	14,00	0,467		
Ligne de Brive à Tulle.	Bonnel. .	226,80	56,00	28,00	0,500	Gneiss lamellaire (très-dur.)	La section de la gale[rie] est de 7^{m2},00 et la ha[u]teur sous clef de 5^{m},[…]
	Cornil . .	552,40	36,00	21,00	0,583	Gneiss lamellaire (moins dur.)	
	Murat . .	253,70	29,00	15,00	0,517	Granite feuille morte en gros bancs.	
	Rochette.	64,00	30,00	15,00	0,500		

(*) Nous devons à l'obligeance de M. Bonafous, ingénieur des ponts et chaussées, les renseignements relatifs à la ligne de Carcassonne à Quillan. — M. Liébeaux, ingénieur de la compagnie d'Orléans, a bien voulu nous communiquer ceux relatifs à la ligne de Brive à Tulle. Ces derniers sont extraits des décomptes et diffèrent peu d'ailleurs des prix de revient qui figurent au compte rendu de M. l'ingénieur en chef Dupuy.

On voit qu'à part l'exception présentée par le souterrain de Cornil, le rapport $\frac{\varpi}{\Pi}$ varie de 0,467 à 0,517; la moyenne est de 0,496, et l'écart maximum entre cette moyenne et les limites extrêmes est de 2 p. 100.

Tous ces souterrains n'ont que $5^m,20$ de hauteur sous clef. Si on l'augmente, tout en conservant la même section pour la petite galerie, Π ne varie pas, et ϖ diminue. Avec les dimensions que nous avons admises, nous devons donc adopter pour $\frac{\varpi}{\Pi}$ une valeur inférieure à la moyenne 0,496.

Confirmation des résultats précédents par l'application des formules de M. Nordling.

P étant le prix du déblai à ciel ouvert (fouille, charge et décharge), M. Nordling admet que :

La galerie d'avancement coûte par mètre cube.	9 P
L'abatage au large de la galerie d'avancement.	4 P
La cunette du stross.	4 P
L'abatage du stross.	2 P
La reprise en sous-œuvre pour l'emplacement des piédroits.	4 P
Le déblai de l'aqueduc.	4 P

Ces formules doivent être légèrement modifiées eu égard au mode d'exécution suivi, que nous rappelons en quelques mots (voir *fig.* 5). Il diffère peu de la méthode belge. Après le percement de la galerie de reconnaissance sur $6^m,55$ de section (*), exécuté en régie avant les adjudications, on abat la calotte jusqu'au seuil de cette galerie, puis on la défonce jusqu'au niveau des naissances de la voûte (soit 4 mètres au-dessous de la clef), en donnant à cette cunette, dite du petit stross, une largeur à la base de

(*) La section théorique est de $6^{mq},55$; pratiquement elle a toujours atteint 7 mètres carrés.

3 mètres, qui permet d'y faire passer un wagonnet; on abat ensuite au large le petit stross, et on construit les maçonneries de la voûte. On pratique alors sur l'axe, dans le massif inférieur, une galerie de 3 mètres de largeur à la base, dite de grand stross, descendant jusqu'à la cote rouge, puis on reprend les piédroits en sous-œuvre, et on exécute enfin le règlement de la plate-forme et le déblai de l'aqueduc.

Nous avons conservé, pour le percement de la petite galerie, la reprise en sous-œuvre et les règlements des prix donnés par M. Nordling. Le prix d'abatage en calotte, que nous avons reconnu être trop faible pour un souterrain à une voie, a été porté à 5 P, et celui du fonçage de la cunette du petit stross abaissé à 3 P. L'abatage du petit stross, étant d'une exécution très-facile, a été estimé, malgré la sujétion de règlement, 2 P comme celui du grand stross des souterrains à deux voies. Pour un souterrain à une voie, l'abatage du grand stross, dont le cube est fort réduit, s'exécute en même temps que le défoncement de la cunette, dont le prix diminue, la section augmentant. Ce prix doit être inférieur à 3 P, prix du défoncement de la cunette du petit stross, et supérieur à 2 P, prix de l'abatage au large du stross pour les souterrains à deux voies; nous l'avons estimé 2,5 P (*).

Le prix de percement du mètre courant X, pour un revêtement de $0^{m},40$, s'évaluera dès lors comme suit :

(*) Ces modifications que nous avons introduites sur l'avis de différents tâcherons que nous avons consultés sont pleinement justifiées par les attachements que nous avons fait prendre dans les souterrains des Achatis et de la Rouvière.

DÉSIGNATION DES TRAVAUX.	SURFACE.	PRIX de l'unité.	PRIX TOTAL.
Ouverture de la petite galerie.	6,45	9,0 P	58,05 P
Abatage en calotte de la petite galerie.	4,521	5,0 P	22,505 P
Surface supplémentaire de la rigole. .	0,0924	4,0 P	0,3606 P
Petit stross (fonçage de la cunette). .	4,9636	3,0 P	14,8908 P
Petit stross (abatage).	4,01636	2,0 P	8,03212P
Fonçage de la cunette du grand stross.	9,72	2,5 P	24,30 P
Reprise en sous-œuvre des pieds-droits.	3,898	4,0 P	15,592 P
Aqueducs, règlements et relevage. . . .	1,738	4,0 P	6,952 P
Totaux.			150,79212P
En y ajoutant 1/15 pour imprévu, outils et faux frais.			10,05 P
			160,84 P
1/10 pour bénéfice.			16,08 P
Total.			176,92 P

On aura ainsi, pour prix du mètre courant, $X = 177$P pour une section de $35^{m^2},4$, et pour prix du mètre cube $\varpi = 5$ P.

Or le prix du mètre cube déblayé en petite galerie est, en tenant compte du $\frac{1}{15}$ pour faux frais et du $\frac{1}{10}$ pour bénéfice, $\Pi = 10{,}6$ P. On aura donc $\frac{\varpi}{\Pi} = \frac{5}{10{,}6} = 0{,}47$. Nous avons trouvé précédemment, pour valeur de ce rapport, 0,496 (*).

(*) Un entrepreneur nous a communiqué les chiffres suivants qui confirment encore les formules que nous venons d'établir. — P indiquant le prix du déblai à ciel ouvert (fouille, charge et décharge).

Le prix du mètre cube déblayé dans la galerie d'avancement vaut.	de 14 à 15 P pour une section de 4 à 5 mèt. c. de 12 à 13 P pour une section de 5 à 6 mèt. c. de 10 à 11 P pour une section de 6 à 7 mèt. c.
Pour les abatages, la cunette et le stross.	de 4,0 à 5 P pour un souterrain à une voie. de 3,5 à 4 P pour un souterrain à deux voies.
Pour la reprise en sous-œuvre et les relevages.	4,00 P pour un souterrain à une voie. 3,33 P pour un souterrain à deux voies.

Suivant un autre, en désignant par ϖ' le prix du mètre cube de

Comparons maintenant ces formules aux prix réels de revient des quatre souterrains du premier arrondissement de la ligne de Sévérac, on verra que les rabais des adjudications ont ramené aux limites qui viennent d'être indiquées les prix qui figuraient dans les sous-détails et qui avaient été établis en augmentant sensiblement les résultats donnés par les formules précédentes.

Justification des formules précédemment indiquées par les prix réels de revient des quatre souterrains du 1er arrondissement de la ligne de Mende à Sévérac.

Nous indiquerons d'abord sommairement les dépenses auxquelles a donné lieu le percement des galeries de reconnaissance ouvertes sur 7 mètres carrés de section.

PERCEMENT DES GALERIES DE RECONNAISSANCE.

Renseignements généraux. — Les chantiers étaient organisés par 3 postes de 8 heures, comprenant chacun 6 mineurs travaillant à la masse couple, et un chef mineur travaillant ordinairement derrière le poste d'attaque à des coups de relevage. Chaque poste, sauf de très-rares excep-

---

l'achèvement, on aurait : $\varpi' = \frac{\Pi}{4}$ pour les souterrains à voie unique, et $\varpi' = \frac{\Pi}{5}$ pour les souterrains à 2 voies. Ce qui donnerait pour les premiers, $\varpi = 0{,}42\,\Pi$, et pour les autres $\varpi = 0{,}3\,\Pi$. En y ajoutant le $\frac{1}{15}$ et le $\frac{1}{10}$, on retrouve à peu près les rapports indiqués plus haut. — Ce rapport $\varpi' = \frac{\Pi}{4}$ entre le prix de déblai en couronne et au revanché est celui qui a été trouvé pour les roches dures, dans la percée du Lioran pour la route 126. (Voir le mémoire de M. Ruelle, *Annales*, 1846.)

Au dire d'un troisième, en appelant comme plus haut, ϖ' le prix du mètre cube d'achèvement, on a $\varpi' = 3\,P$ et $3{,}5\,P$, suivant la dureté de la roche. 3 P s'applique aux roches tendres, 3,5 P aux roches de dureté moyenne. Pour $\varpi' = 3{,}5\,P$. on trouve $\varpi = 5\,P$.

tions, a obtenu, quelle que fût la dureté de la roche, 4 volées de 3 trous de 0,60, soit une volée par 2 heures (*).

Souterrain de la Farelle (longueur $304^{m},85$). — Il est ouvert sur la moitié environ de sa longueur (côté Mende), dans le calcaire à fucoïdes qui forme la base de l'oolithe inférieure (calcaire marneux, bleu, compacte avec lits de silex, en bancs réglés) dont les assises à 150 mètres de la tête Mende, viennent butter contre l'étage de la dolomie caverneuse, qui couronne l'oolithe inférieure, roche très-cristalline en masses non stratifiées, criblées de poches à

(*) Il a été difficile, à cause de l'irrégularité des arrivages de dynamite et des variations dans la dureté de la roche rencontrée, de constater avec quelque précision les effets comparatifs de la poudre et de la dynamite; cependant on peut conclure des tableaux graphiques des dépenses faites en galerie, que ces dépenses ont été réduites par l'emploi de la dynamite de 25 à 30 °/₀ au minimum. On peut se rendre compte comme suit de cette réduction.

Admettons avec Traüzl (*Description de la dynamite*, Vienne, 1869), que la nitroglycérine a 5 ou 6 fois plus de force que la poudre : la dynamite qui contient $\frac{75}{100}$ de nitroglycérine aura alors, à poids égal, de 3 à 4 fois et demie autant de force que la poudre, ce qui revient à dire que pour le sautage d'un cube donné, il faut en poids au moins 3 fois autant de poudre que de dynamite; soit en volume (la densité de la poudre étant 1,02, celle de la dynamite 1,60) $3 \times \frac{1,6}{1,02} = 4,7$ fois autant de poudre que de dynamite. Les trous à poudre devant avoir 4,7 fois le volume des trous à dynamite, nécessiteront 4,7 fois autant de main-d'œuvre.

La poudre coûte $2^{f},50$ le kilog.; la dynamite de Paulille, n° 1, $7^{f},50$, soit 3 fois plus cher que la poudre. La matière explosible pour abattre un cube donné coûtera donc, en négligeant le prix des mèches et des capsules, le même prix dans les deux cas; et on économisera 3,7 fois la main-d'œuvre nécessaire pour exécuter ce déblai à la poudre. Dans du gneiss à 4 francs, pour lequel on compte 4 heures de mineur à $0^{f},38$, soit $1^{f},52$, ce serait une réduction de $0,8 \times 1,33 = 1^{f},21$, soit $\frac{30}{100}$ du prix de revient.

Ces chiffres ne s'appliquent qu'aux déblais s'exploitant à l'aide de matières explosives et non à ceux qui permettent l'emploi simultané de la mine et des outils ordinaires; pour ceux-là la poudre est ordinairement d'un emploi plus économique.

bauxite, d'une exploitation difficile à la poudre à cause de ces cavités dans lesquelles se détendent les gaz de la combustion. La dynamite a donné pour cette roche d'excellents résultats, dus sans doute à l'instantanéité de l'explosion; l'effet est produit avant que les gaz aient eu le temps de se dégager par les interstices des couches.

Le percement a été exécuté du 20 mai 1875 au 20 avril 1876, soit 291 jours de travail effectif, correspondant à un avancement moyen de 0,52 par attaque et par jour. Le prix moyen Π du mètre cube déblayé en galerie, sur une section moyenne de $7^{m},20$, boisage compris, a été $37^{f},20$ et celui du mètre linéaire, $267^{f},96$.

Le prix moyen P du mètre cube déblayé à ciel ouvert est $3^{f},25$. On voit que le rapport $\frac{\Pi}{P} = 11,4$ est un peu supérieur à celui qui résulte des formules de M. Nordling.

Souterrain de Becdejeu (longueur $133^{m},60$). — La tête Mende du souterrain de Becdejeu, sur 36 mètres de longueur, est, comme la tête Mende de celui de la Farelle, ouverte dans le calcaire à fucoïdes du lias moyen, auquel succède une terre d'éboulis parfois cimentés en brèche. Nous ne nous occuperons que de la partie percée dans la roche dure.

Le percement a nécessité 62 jours de travail effectif, correspondant à un avancement moyen de 61 centimètres par attaque et par jour.

Le prix Π du mètre cube déblayé en galerie sur $7^{mq},20$, boisages compris, a été de $36^{f},80$; celui du mètre linéaire, $265^{f},02$.

Le prix moyen P du mètre cube de déblai à ciel ouvert est $3^{f},25$, le rapport $\frac{\Pi}{P}$ (11,3) est, comme pour le souterrain de la Farelle, supérieur à celui qui résulte des formules de M. Nordling.

Souterrain des Achatis (longueur $117^{m},50$). — Il est

ouvert dans du schiste dioritique, peu feuilleté dans le corps du souterrain où il se transforme en gneiss, très-délité aux têtes où il s'est laminé en minces feuillets, sous la pression des dernières assises du lias. On a rencontré à la tête Sévérac une poche de kaolin résultant probablement de la décomposition du feldspath du gneiss (*). Le prix moyen π du mètre cube déblayé en galerie sur 7 mètres carrés, boisages compris, a été de 33f,61; celui du mètre linéaire de 235f,27. Le prix moyen P du mètre cube déblayé à ciel ouvert est 3 francs, on en conclut $\frac{\Pi}{P} = 11,2.$

Souterrain de la Rouvière (longueur 345m,70). — Il est ouvert dans du gneiss lamellaire cristallin extrêmement compacte, sauf à la tête Sévérac qui est établie dans du schiste disloqué, voisin des arkoses de l'infralias. Près de la tête Mende, on a rencontré des veines de quartzite d'une dureté exceptionnelle : le prix du mètre linéaire de galerie y a atteint 500 francs, et on n'y avançait que de 26 centimètres par jour. — L'avancement moyen a été de 51 centimètresp ar jour. — Le prix moyen Π du mètre cube déblayé en galerie, boisages compris, s'est élevé à 46f,47; celui du mètre linéaire à 314f,59. — Le prix moyen P du mètre cube du même déblai à ciel ouvert est de 5 francs; on en conclut $\frac{\Pi}{P} = 9,27.$

On voit que pour ces quatre souterrains, le prix du mètre cube déblayé en galerie sur une section de 7 mètres carrés est de 9,27 à 11,3 fois le prix du mètre cube de déblai exécuté à ciel ouvert.

(*) Le silicate de potasse a disparu; il ne reste qu'un silicate d'alumine plus ou moins hydraté.

Achèvement du percement. — Prix résultant des adjudications.

Souterrain de la Farelle. — Le prix du mètre courant d'achèvement du type 1, rabais déduit, est de $308^f,83$, soit $\frac{308,83}{28,4} = 10^f,87$ le mètre cube. Or, l'entrepreneur a refusé de le sous-traiter à un tâcheron qui offrait de l'exécuter à 10 francs. On peut donc considérer ce prix comme très-suffisant. On en conclut :

$$X \text{ (prix total du mètre courant)} = 267,96 + 308,83 = 576,79$$
$$= 177,4P \text{ (P étant estimé } 3^f,25) \ \varpi = \frac{576,79}{35,4} = 16,30 = 5P$$

et $$\frac{\varpi}{\Pi} = \frac{16,30}{37,20} = 0,44.$$

Souterrain de Becdejeu. — L'achèvement du mètre courant du type 1 a été adjugé à $305^f,27$, soit $\frac{305,27}{28,4} = 10,75$. Les deux souterrains de Becdejeu et de la Farelle étant percés dans la même roche, ce prix de $10^f,75$ trouve sa justification dans l'offre faite par un tâcheron d'exécuter à 10 francs celui de la Farelle. On en conclut :

$$X = 265,01 + 305,27 = 570,28 = 175P \text{ (au lieu de } 177P),$$
$$\varpi = \frac{570,28}{35,4} = 16^f,10 = 4,95P \quad \text{et} \quad \frac{\varpi}{\Pi} = 0,44.$$

Souterrain des Achatis. — Le prix prévu dans le projet pour l'achèvement du mètre linéaire du type 1 était 420 francs, que le rabais de l'adjudication a réduit à 378 francs, soit par mètre cube $13^f,30$. (Un tâcheron l'exécute à 11 francs.) On en conclut :

$$X = 235,27 + 378 = 613,27, \quad \varpi = \frac{X}{35,4} = 17^f,17 = 5,7P$$

et $$\frac{\varpi}{\Pi} = 0.51.$$

Souterrain de la Rouvière. — L'achèvement du type 1 a été adjugé à 495 francs, soit $17^f,07$ le mètre cube. D'où :

$$X = 314,59 + 495 = 809,59, \quad \varpi = \frac{X}{35,4} = 23^f,00 = 5,2P$$

et

$$\frac{\varpi}{\Pi} = 0,50.$$

Pour ces deux souterrains qui ont été les premiers adjugés, nous avions augmenté sensiblement les résultats des formules de M. Nordling. Les attachements pris, les rabais proposés par des tâcherons, ceux des ajudications ultérieures prouvent que les prix portés pour ces deux souterrains sont beaucoup trop élevés.

Nous avons résumé ces divers résultats dans le tableau ci-après :

DÉSIGNATION des souterrains.	LONGUEUR.	PRIX du mètre courant de percement sur une section de $35^{m2},4$ X	PRIX du mètre cube de déblai en galerie, section de $7^{m2},00$ Π	PRIX du mètre cube de déblai pour toute la section ϖ	RAPPORT $\frac{\varpi}{\Pi}$	PRIX du mètre cube de même déblai à ciel ouvert (fouille, charge et décharge) P	RAPPORT $\frac{\varpi}{P}$	NATURE du terrain.
	mètres.	francs.	francs.	francs.		francs.		
La Farelle. .	350	576,69	37,20	16,30	0,44(*)	3,25	5,00	Calcaire à fucoïdes et dolomie.
Becdejeu. . .	151	570,28	36,80	16,10	0,44	3,25	4,95	Calcaire à fucoïdes.
Les Achatis..	118	613,00	33,61	17,17	0,51	3,00	5,70	Schiste et gneiss.
La Rouvière.	351	850,00	46,37	23,80	0,50	5,00	4,76	Gneiss cristallin.

(*) Les prix des galeries des deux souterrains de la Farelle et de Becdejeu ont été très-rémunérateurs. Le coefficient 0,44 doit donc être considéré comme trop faible.

Si l'on remarque que ces souterrains font partie de lots considérables ($1.200.000^f$, — $2.060.00^f$, — $2.600.000^f$), que les maçonneries pour lesquelles nous reconnaissons que les prix ne sont que suffisants, entrent pour les $\frac{2}{3}$ dans le montant total des projets, on concluera que les résultats

consignés dans le tableau précédent sont des limites supérieures qui seront rarement atteintes.

Conclusion pour l'établissement du prix de percement du mètre courant de souterrain à une voie.

Il ne s'agit, comme nous l'avons dit plus haut, que de souterrains ouverts dans le rocher dur (à $2^f,50$ au moins) et assez courts pour n'être attaqués que par les têtes (soit d'une longueur inférieure à 600 mètres).

S'il a été exécuté une galerie de reconnaissance, on connaît le prix Π du mètre cube déblayé en galerie. En appelant comme précédemment ϖ le prix du mètre cube de déblai pour l'ensemble de la section, y compris la galerie d'avancement, on admettra $\varpi = 0,48\Pi$.

(Ce rapport devrait être réduit dans des cas spéciaux, tel que celui de schistes à feuillets perpendiculaires à l'axe des souterrains; toute la difficulté consiste alors dans le percement de la petite galerie; ce percement fait, les abatages s'exécutent très-facilement.) Nous supposons aux galeries d'avancement une section de $6^{m^2},50$ à 7 mètres carrés. Il est bien évident que, pour un type donné, le rapport $\frac{\varpi}{\Pi}$ diminue quand cette section augmente et inversement.

S'il n'a pas été exécuté de petite galerie, on admettra que le prix moyen du mètre cube de déblai en souterrain est égal à 5 fois le prix P du mètre cube du déblai exécuté à ciel ouvert (fouille et charge) dans des roches rigoureusement identiques comme difficultés d'extraction. Il est essentiel de remarquer que les goulets de têtes, ou les tranchées de faible profondeur sont en général ouverts dans des roches plus ou moins décomposées, d'une extraction plus facile que celles qui seront rencontrées pendant le souterrain. On n'aura pour P une valeur exacte que par

des attachements pris pendant l'exécution de tranchées profondes ou par des sondages à fond. On aura dès lors pour prix de percement d'un souterrain à une voie, sur une section de $35^{mq},40$ (type avec revêtement de 0,40), $X = 177P$. Le tableau ci-après donne les valeurs de X correspondant à différentes valeurs de P.

VALEURS de P.	PRIX de percement du mètre courant $X = 177\ P$ (nombre rond).	PRIX du mètre cube en souterrain $\varpi = 5\ P$	OBSERVATIONS.
francs.	francs.	francs.	
2,50	443	12,50	Calcaires en bancs minces d'extraction facile. — Schistes délités, etc.
3,00	531	15,00	Calcaire dur.— Dolomie. - Micaschiste argileux. — Granite facile.
3,50	620	17,50	Granite ordinaire. — Schistes durs. — Brèches volcaniques.— Trachytes, etc.
4,00	708	20,00	Granite quartzeux en masse sans délits. — Micaschistes quartzeux, etc.
5,00	885	25,00	Roches d'une dureté exceptionnelle.— Gneiss lamellaire cristallin.— Quartzite, etc.

Dans le prix de déblai X sont compris le déblai des caponnières, les frais d'épuisement, d'éclairage et de ventilation, enfin les outils, faux frais et bénéfices. X comprend encore les frais de transport au lieu de dépôt. On remarquera que pour un souterrain de 600 mètres (longueur maxima d'un souterrain attaqué seulement par les têtes), la distance moyenne de transport aux têtes est 150 mètres; en doublant cette distance pour tenir compte du transport des têtes au lieu de dépôt, on trouve comme prix moyen de transport $0^{f},62$ par application de la formule $0,50 + \frac{4D}{10.000}$, lequel pourra être implicitement compris dans le prix 5P du mètre cube déblayé en souterrain. X comprend enfin la fourniture et les boisages qu'il vaut mieux ne pas faire entrer en compte dans les sous-détails pour échapper aux réclamations des entrepreneurs relativement

à l'insuffisance des boisages prévus; ce qui revient à admettre que si les roches sont moins dures qu'on ne le prévoit, la diminution du prix de déblai compensera l'augmentation des boisages.

Prix du revêtement.

Nous avons résumé dans le tableau ci-après le prix des revêtements des différents types. Ce sont des moyennes entre les prix prévus pour les maçonneries des différents lots réduits par les rabais des adjudications. Ces prix demeurent encore très-élevés et supposent une extraction difficile et de longs transports.

DÉSIGNATION DES TRAVAUX.		PRIX de l'unité.	TYPE N° 0. Sans revêtement, surface à déblayer 28^{mq}.		TYPE N° 0 *bis*. Revêtement partiel de $0^{m},40$, surface à déblayer $32^{mq},35$.		TYPE N° 1, revêtement de $0^{m},40$, surface à déblayer $35^{mq},40$.		TYPE N° 2, Revêtement de $0^{m},60$, surface à déblayer $40^{mq},55$.	
			Quantités.	Produits.	Quantités.	Produits.	Quantités.	Produits.	Quantités.	Produits.
Maçonnerie (au m. cube).	**Moellons ordinaires des carrières**, à chaux du Teil, non appareillés en coupe. (Reins et pieds-droits du revêtement. Pieds-droits de l'aqueduc.)	18,00	0,197	3,546	0,197	3,546	3,20	57,600	3,97	71,460
	Moellons ordinaires de carrières, à chaux du Teil, appareillés en coupe (faisant suite aux moellons tétués de l'intrados)	19,50	»	»	»	»	»	»	2,492	48,594
	Moellons tétués de carrières, à chaux du Teil, appareillés en voûte. (Revêtement de la douelle et clavage.)	24,00	»	»	3,5044	84,106	3,5044	84,106	3,639	87,336
	Dalles (recouvrement de l'aqueduc).	30,00	0,069	2,070	0,069	2,070	0,069	2,070	0,069	2,070
	Cube total de maçonnerie devant subir la plus-value pour emploi en souterrain.	4,00	0,266	1 064	3,774	15.081	6,7734	27,093	10,170	40,680
Parements vus et rejointoiements.	**Moellons tétués**	1,50	»	»	8,3339	12,500	8,3339	12,500	8,3339	12,500
	Maçonnerie ordinaire (parement et jointoiement).	0,60	»	»	»	»	6,0522	3,6313	6,0522	3,6313
	Rejointoiement de l'intrados en mortier de ciment à prise rapide.	1,80	»	»	8,3339	15,001	8,3339	15,001	8.3339	15,001
	Rejointoiement des pieds-droits en mortier de chaux du Teil.	0,85	»	»	»	»	6,0522	5,144	6,0522	5,144
Cintrage.	**Cintrage au mètre courant de souterrain**, calculé à 3f,50 le mètre carré de douelle, en ne comptant que les parties en contre-haut du joint à 1 mètre au-dessus des naissances.	30,00	»	»	1,000	30,000	1.000	30,000	1,000	30.000
Totaux.				6,680		162,304		237,1453		286,5163

Prix du mètre courant de souterrain et du mètre cube de vide.— Percement et revêtement.

En arrondissant les résultats du tableau précédent, on a, pour le prix total du mètre courant et le prix du mètre cube de vide ($25^{mq},40$), les formules suivantes :

TYPE N° 0 (*sans revêtement*).

$$X = 6^{f}.70 + 28 \times 5P = 6,70 + 140P - p = 5,5P.$$

TYPE N° 0 *bis* (*revêtement partiel de* 0,40).

$$X = 165^{f} + 32,35 \times 5P = 165 + 162P - p = 6,4 + 6,4P.$$

TYPE N° 1 (*revêtement de* 0,40).

$$X = 238^{f} + 35,4 \times 5P = 238 + 117P - p = 9,4 + 7P.$$

TYPE N° 2 (*revêtement de* 0,60).

$$X = 287^{f} + 40,5 \times 5P = 287 + 202P - p = 11 + 8P.$$

Le tableau ci-après donne les différentes valeurs de X et de p correspondant à différentes valeurs de P, pour un revêtement de $0^{m},40$.

VALEUR de P	PRIX du mètre courant, revêtement compris. X	PRIX du mètre cube de vide entre l'intrados et les rails pour une surface de vide de $35^{mq},40$.	OBSERVATIONS.
francs.	francs.	francs.	
33.00	769,00	30,50	Calcaires durs. — Dolomies. — Granite facile. — Micaschiste argileux.
3,50	858,00	34,00	Granite ordinaire. — Brèches volcaniques. — Trachytes. — Schistes durs.
40,0	946,00	37,50	Granite quartzeux en masses sans délit. — Micaschiste quartzeux.
5,00	1,123,00	44,50	Roches d'une dureté exceptionnelle. — Quartzites, etc.

Hauteur d'équilibre des dépenses par mètre courant entre un souterrain et une tranchée. — (*Cas du revêtement de* 0,40.)

Le cube, par mètre courant d'une tranchée à largeur réduite (6 mètres de largeur de plate-forme, y compris deux fossés de $\frac{0,40}{0,40}$) est, en appelant x sa hauteur sur l'axe, n l'inclinaison des talus, et supposant le terrain horizontal au niveau de la cote rouge (ce qui réduit légèrement la surface du profil), $x(6 + nx) + 0,32$. Soit P le prix du mètre cube de déblai; le prix de transport à une distance moyenne de 500 mètres est, par application de la formule $0,5 + \frac{4D}{10.000} = 0^f,70$, valeur qui pouvait être comprise dans le prix 5P du déblai en souterrain et qui n'est pas négligeable devant P. Le prix du déblai (transport compris) par mètre courant d'une tranchée de hauteur x, sera donc $[x(6 + nx) + 0,32]\,(P + 0,70)$, auquel il faut ajouter celui des deux murettes de $\frac{0,50}{0,50}$ qui soutiennent le ballast : soit, à 18 francs le mètre cube, 9 francs. La hauteur d'égalité de dépenses entre cette tranchée et un souterrain avec revêtement de $0^m,40$ sera donnée par l'équation :

$$[x(6 + nx) + 0,32](P + 0,70) + 9 = 238 + 177P.$$

Le tableau ci-après qui donne les différentes cotes d'égalité pour différentes valeurs de N et de P, montre que pour une même inclinaison de talus, la hauteur d'équilibre s'abaisse quand la dureté de la roche augmente.

VALEURS de P.	$n=\frac{1}{2}$	$n=\frac{1}{3}$	$n=\frac{1}{4}$	$n=\frac{1}{5}$	OBSERVATIONS.
2,50	15,32	17,64	19,34	20,67	Lorsque l'on adopte la solution du souterrain, on le prolonge dans les tranchées qui lui font suite au delà de la hauteur d'équilibre; on évite ainsi les travaux de consolidation et de décapement des talus des têtes et les encombrements de neiges pour les souterrains percés à de hautes altitudes.
3,00	15,12	17,38	19,05	20,36	
4,00	14,83	17.04	18,66	19,90	
5,00	14,64	16,82	18,40	19,65	

En adoptant soit le type de la Cie P. L. M., soit celui de l'Orléans (ligne de Brives à Tulle) que nous étudierons plus loin, les hauteurs d'équilibre seraient données par les deux équations :

$$[x(6+nx)+0{,}32](P+0{,}70)+9^{t}=227+165P \quad (\text{C}^{ie}\ \text{P. L. M.})$$
$$[x(6+nx)+0{,}32](P+0{,}70)+9^{t}=219+158P \quad (\text{C}^{ie}\ \text{d'Orléans})$$

Les solutions correspondant à différentes valeurs de n et de P sont consignées dans le tableau ci-après :

VALEURS de P	TYPE DE LA COMPAGNIE Paris-Lyon-Méditerranée. (Lignes de Brioude à Alais, Alais au Pouzin.) Valeurs de x pour :				TYPE DE LA COMPAGNIE d'Orléans. (Ligne de Brive à Tulle.) Valeurs de x pour :			
	$n=\frac{1}{2}$	$n=\frac{1}{3}$	$n=\frac{1}{4}$	$n=\frac{1}{5}$	$n=\frac{1}{2}$	$n=\frac{1}{3}$	$n=\frac{1}{4}$	$n=\frac{1}{5}$
francs.								
3,00	14,6	16,7	18,3	19,5	14,12	16,19	17,07	18,88
4,00	14,2	16,3	17,9	19,0	13,84	15,85	17,31	18,46
5,00	14,1	16,1	17.6	18,8	13,65	15,62	17,06	18,18

Comparaison du type n° 1 avec les types adoptés par les compagnies pour revêtement de 0,40.

On se rendra compte de l'augmentation de dépense, résultant de l'excédant de hauteur sous clef prescrit par la décision du 14 janvier 1875, en calculant ce qu'auraient coûté avec le même système de construction les différents types en usage dans les compagnies pour le revêtement de 0,40. Les résultats qui permettent d'établir cette comparaison sont consignés dans le tableau ci-dessous.

DÉSIGNATION.	Hauteur de l'intrados au-dessus des rails.	Hauteur des naissances au-dessus des rails.	Largeur aux naissances.	Largeur au niveau des rails.	Surface entre le rail et l'intrados (vide).	Surface du déblai.	Prix du déblai (à 5 P).	Prix de la maçonnerie.	Prix du mètre courant.	Prix du mètre cube de vide (entre les rails et la voûte).	DIFFÉRENCE entre le prix du mètre courant du type et celui adopté pour la ligne de Mende à Sévérac.			Différence entre les surfaces de vide en faveur du type de la ligne de Mende à Sévérac.
											Formule générale.	Pour P = 3.	Pour P = 4.	
								francs.				francs.	francs.	mèt. carrés.
Compagnie du Midi. Ligne de Rodez à Montpellier. . . .	5,00	1,85	5,00	4,75	21,54	30 20	151 P	204,00	204+151 P	9,5+7 P	34+28 P	118,00	146,00	3,86
Compagnie d'Orléans. Ligne de Brive à Tulle.	5,20	2,76	4,88	4,75	22,40	31 59	158 P	219,00	219+158 P	9,8+7 P	19+19 P	76,00	95,00	3,00
Compagnie Paris-Lyon-Méditerranée. Ligne de Brioude à Alais.	5,50	2,15	5,00	4,70	23,56	33,05	165 P	227,00	227+165 P	9,7+7 P	9+11 P	42,00	53,00	2,35
Compagnie d'Orléans. Ligne de Murat à Vic-sur-Cère. . . .	5,50	3,00	5,00	4,32	24,25	33,80	169 P	229,00	229+169 P	9,4+7 P	9+ 8 P	33,00	41,00	1,15
Chemin de fer de Mende à Sévérac.	6,00	2,00	5,00	4,50	25,40	35,40	177 P	238,00	238+177 P	9,4+7 P	»	»	»	«

OBSERVATIONS.

1° On a adopté rigoureusement pour ces types le même système de construction afin de rendre comparables entre elles les dépenses d'exécution (revêtement en moellons tétués à partir du joint situé à 1,00 mètre au-dessus des naissances, relevage de 0m,10 au-dessus de l'intrados de la voûte, etc.), et on a appliqué les prix portés au tableau précédent. — 2° On remarquera qu'à égalité de périmètre le type de l'Orléans donne une plus grande surface de vide que celui de la Cie P. L. M. Cette différence s'explique par la forme en plein cintre donnée à l'intrados pour le type d'Orléans.

Ainsi, on réaliserait par mètre courant une économie de 9 + 11 P en adoptant le type de la Cie P. L. M., lequel n'a présenté aucun inconvénient au point de vue de l'aérage, pour tous les souterrains de la ligne de Brioude à Alais, compris entre Langeac et la Bastide, dont l'un atteint 583 mètres; il nous semble qu'il y aurait lieu de l'adopter pour tous les tronçons qui s'exploitent à simple traction quelle qu'en soit la longueur, et même d'abaisser à $5^{m},20$ la hauteur sous clef pour les petits souterrains, ce qui permettrait de réaliser une économie de 19 + 19 P par mètre courant.

Cette hauteur réduite a, comme nous l'avons dit, été admise pour les souterrains de la ligne de Carcassonne à Quillan construite par l'État, dont les longueurs varient de 175 à 238 mètres et pour ceux de la ligne de Brive à Tulle dont l'un a une longueur de $552^{m},40$ (Cornil).

Dans les longs souterrains à forte rampe nécessitant la double traction, on appliquerait le type de 6 mètres pour prévenir des accidents analogues à ceux qui se sont produits dans les souterrains d'Altier (1.200^{m}) et d'Albespeyres (1.500^{m}) en rampes de 25 millimètres entre Villefort et la Bastide (*).

Nous ne voyons pas qu'il y ait plus d'inconvénient à appliquer pour une même ligne des types différents de souterrains que des formes différentes de passages par-dessus; il nous semble rationnel d'appliquer dans chaque cas le type le plus économique que l'expérience a montré pouvoir être adopté sans danger, et de n'accepter la dépense résultant du supplément de hauteur que dans le cas seulement où elle est justifiée par la nécessité d'assurer l'aérage.

(*) Voir M. Couche, *Exploitation des chemins de fer*, t. II, p. 563 à 567.

Étant admise la hauteur sous clef de 6 mètres, y a-t-il économie sérieuse à l'exécution d'un souterrain à une voie et ne vaudrait-il pas mieux l'exécuter immédiatement pour deux, sauf à ajourner l'enlèvement d'une partie du stross?

On voit par le tableau précédent, qu'en adoptant la hauteur de 6 mètres sous clef pour les souterrains à voie unique, on en augmente sensiblement la dépense, qui se rapproche alors de celle d'un souterrain à deux voies.

Imaginons, comme nous en montrerons plus loin la possibilité, qu'on exécute immédiatement le souterrain pour deux voies, en ajournant l'enlèvement du stross jusqu'au moment de la pose de la seconde voie, et examinons si la différence de dépense entre cette exécution partielle et celle du souterrain à voie unique est assez sensible pour justifier l'adoption de ce dernier système.

Nous appliquerons le type de souterrain à deux voies adopté pour la ligne de Rodez à Millau. L'intrados est appareillé suivant un arc de cercle de $4^{m},15$ de rayon, se continuant par deux tangentes qui coupent l'horizontale du niveau des rails à 4 mètres, de part et d'autre de l'axe. La hauteur sous clef est de 6 mètres.

Supposons (*fig.* 6 et 7) qu'on perce la galerie de reconnaissance sur l'axe de la double voie, et qu'après les abatages en calotte, on déblaie le petit stross jusqu'à 80 centimètres au-dessus des naissances. On exécute alors les maçonneries de la voûte, et comme l'inclinaison sur l'horizontale du voussoir des retombées est inférieure à l'angle de glissement, celles des reins et du piédroit peuvent s'achever sans cintre. On fonce ensuite jusqu'à la cote rouge et à peu près sur l'axe de la voie unique, la cunette du grand stross, et on exécute la reprise en sous-œuvre et les maçonneries du piédroit, puis on abat le grand stross suivant un talus qui coupe l'horizontale du rail à $4^{m},50$ du pied des revêtements, et enfin on exécute le déblai et les maçonneries de l'aqueduc, lequel se trouve ainsi sur la

double voie (sur l'axe) dans la position qu'il occupera définitivement. Comme il s'agit de souterrains percés dans la roche dure, le stross, eu égard à sa faible hauteur se maintiendra facilement au talus du cinquième. Si la roche était très-gélive, on adoucirait ce talus aux abords des têtes, et au besoin on la muraillerait. Il reste ainsi en couronne une banquette de 3 mètres de largeur, largement suffisante pour maintenir les retombées de la voûte, qui reposera, comme d'usage, sur des madriers longitudinaux, pour permettre ultérieurement la reprise en sous-œuvre.

Pour ne pas laisser au souterrain l'aspect d'un ouvrage inachevé, on en exécuterait le déblai en pleine section sur quelques mètres en arrière des têtes.

Quelle serait la dépense de cette exécution partielle?

Soit A la somme à dépenser immédiatement, B la somme à dépenser pour l'achèvement du déblai et l'exécution du revêtement du piédroit.

Calcul de A.

1° PRIX DU PERCEMENT.

L'évaluation en a été faite en appliquant les mêmes bases que dans le cas du souterrain à voie unique (voir *fig*. 7).

DÉSIGNATION DES TRAVAUX.	QUANTITÉS.	PRIX de l'unité.	PRODUITS
1° Petite galerie	6,500	9,0 P	58,500 P
2° Abatage au large de la petite galerie	10,932	4,0 P	43,728 P
3° Fonçage de la cunette du petit stross	2,940	3,0 P	8,820 P
4° Abatage du petit stross	3,908	2 0 P	7,816 P
5° Fonçage de la cunette du grand stross	10,080	2,5 P	25,200 P
6° Abatage du grand stross	3,210	2,0 P	6,420 P
7° Reprise en sous-œuvre du pied-droit	3,000	4,0 P	12,000 P
8° Aqueduc, règlement de la plate-forme et de l'extrados	1,655	4,0 P	6,620 P
			169,104 P
En ajoutant $^1/_{15}$ pour outils, faux frais et imprévu			11,273 P
Somme			180,377 P
En ajoutant $1/_{10}$ pour bénéfice			18,038 P
Total			198,415 P

en nombre rond 199P (ce qui donne, pour une surface de $42^{mq},225$, 4,7 P pour prix du mètre cube déblayé).

2° PRIX DU REVÊTEMENT.

DÉSIGNATION des ouvrages.	QUAN-TITÉS.	PRIX de l'unité.	PRO-DUITS.	OBSERVATIONS.
Maçonnerie de moellons têtués appareillés en voûte (au-dessus des joints de rupture)	3,644	fr. 24,00	fr. 87,46	Le cintrage au mètre courant avait été estimé 30 francs pour le souterrain à une voie, soit à $3^{f},50$ environ le mètre carré de douelle. Nous l'avons estimé dans le cas actuel 55 francs, soit à $5^{f},50$ le mètre carré de douelle. On fait ordinairement varier le prix du mètre carré plus rapidement que l'ouverture; mais comme l'épaisseur du revêtement, par conséquent la charge par mètre carré n'augmente pas avec l'ouverture, il nous a paru suffisant de faire varier le prix à peu près comme elle.
Maçonnerie de moellons ordinaires, appareillés en coupe (entre le joint de rupture et le joint situé à $0^{m},80$ au-dessus des naissances).	1,147	19,50	22.36	
Maçonnerie de moellons ordinaires (reins, pieds-droits d'un seul côté et pieds-droits de l'aqueduc).	1,517	18,00	27,31	
Dalle.	0,060	30,00	1,80	
Cube total devant subir la plus-value pour emploi en souterrain	6,368	4,00	25,47	Le périmètre d'intrados du revêtement est de $14^{m},906$; celui du souterrain à une voie du type 1 est de $15^{m},636$. Le prix de ce revêtement (cube et parements) est bien proportionnel au périmètre et coûte moins pour A. Mais comme la dépense de cintrage croît plus vite que l'ouverture, la dépense résultante est plus grande pour A que pour X_1.
Parement vu de moellons têtués et rejointoiement au mortier de ciment. . . .	8,692	3,00	26,08	
Parement vu de maçonnerie ordinaire et rejointoiement.	5,414	1,45	7,85	
Cintrage au mètre courant.	1,000	55,00	55,00	
Prix total			$253^{f},33$	

On aura donc $A = 254^{f} + 199P$; ce qui, pour une surface libre de $33^{mq},70$ entre le rail et l'intrados, donne $7,56 + 5,9P$ pour prix du mètre cube de vide.

Calcul de B. — Dépense de l'élargissement ultérieur.

1° PRIX DU PERCEMENT (voir *fig.* 7).

DÉSIGNATION des ouvrages.	QUANTITÉS.	PRIX de l'unité.	PRODUITS.	OBSERVATIONS.
Achèvement de l'abatage du grand stross	9,060	1,5 P	13,59 P	Au moment de l'élargissement, on utilisera la pr mière voie pour les transports ; on devrait dès l substituer la formule de transport par locomot à la formule de transport par wagon à tracti de chevaux. La première, $X = 0,5 + \frac{4 D}{10.0}$ donne, pour D = 1.000, X = 0,90. La deuxièm $X' = 0,075 + \frac{55 D'}{1.000.000}$, donne, pour D' = 1.0 X' = 0,13. Ce serait une économie de 0,77 p mètre cube. Nous n'en avons pas tenu comp dans le calcul de B estimant qu'elle serait co pensée par les dépenses qu'occasionnerait précaution à prendre pour proteger la maço nerie contre les éclats lancés par la mine.
Réprise en sous œuvre du pied-droit	3,000	4,0 P	12,00 P	
Règlement de la plate-forme	0,175	4,0 P	0,70 P	
			16,29 P	
A ajouter $^1/_{15}$ pour outils, faux frais et imprévu			1,75 P	
Somme			28,04 P	
$^1/_{10}$ pour bénéfice			2,80 P	
Total			30,84 P	= 31 P en nombre rond.

2° PRIX DE L'ACHÈVEMENT DU REVÊTEMENT.

DÉSIGNATION des ouvrages.	QUANTITÉS.	PRIX de l'unité.	PRODUITS.	OBSERVATIONS.
		francs.		
Maçonnerie ordinaire (pied-droit)	1,247	18,00	22,45	Les matériaux étant amenés à pied d'œuvre da des conditions plus faciles, les prix de l'unité d vraient être abaissés pour les maçonneries. (Po les quatre premiers lots de la ligne de Mende Sévérac, le prix de la tonne de chaux du Teil, q est payé en moyenne 60 fr., s'abaisserait à 25 f ce qui, au dosage de 350 kilog., réduirait de 5 le prix du mètre cube de maçonnerie.)
Cube devant subir la plus-value	1,247	4,00	4,99	
Parement vu et rejointoiement	4,046	1,45	5,87	
Total			33,31	

On aura donc $B = 34^f + 31\,P$.

En appelant X_2 le prix du mètre courant de souterrain à deux voies avec revêtement de 0,40, ϖ_2 le prix du mètre

cube de déblai en souterrain, et p_2 le prix total du mètre cube de vide (revêtement compris), on a

$$X_2 = A + B = 230P + 288^f, \quad \varpi_2 = \frac{230P}{54,46} = 4,2P$$

et
$$p_2 = \frac{x_2}{43,10} = 6^f,6 + 5,34P.$$

En désignant par X_1, ϖ_1 et p_1 les quantités correspondantes pour un souterrain à une voie, avec 6 mètres de hauteur sous clef et un revêtement de 0,40, nous avons trouvé :

$$X_1 = 238 + 177P, \quad \varpi_1 = 5P \quad \text{et} \quad p_1 = 9^f,4 + 7P.$$

On en conclut :

$$\frac{\varpi_2}{\varpi_1} = \frac{4,2}{5} = 0,8,$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{6,6 + 5,34P}{9,4 + 7P} = 0,75 \text{ (pour P de 3 à } 4^f).$$

On trouve ainsi $\frac{4}{5}$ pour rapport des prix de l'unité de déblai, et $\frac{3}{4}$ pour rapport des prix du mètre cube de vide. Ces valeurs concordent avec celles ordinairement admises, et justifient la marche que nous avons suivie pour les établir (*).

Calcul du délai assurant l'économie partielle du souterrain à deux voies.

Soit n la valeur en années de ce délai. Au bout de ce temps, le système mixte que nous proposons aura nécessité une dépense de $A(1,05)^n + B$.

(*) M. Nordling admet qu'on a approximativement $p_2 = 30^f$, $p_1 = 40^f$; d'où $\frac{p_2}{p_1} = 0^f,75$, rapport auquel conduisent nos formules (*Annales* 1862; — seconde voie).

Si l'on exécute d'abord le souterrain à une voie, au bout du temps n, il faudra percer un second souterrain à côté du premier et dépenser encore X_1 par mètre courant; la dépense totale sera $X_1(1{,}05)^n + X_1$. Il y aura économie à appliquer le premier système, si $A(1{,}05)^n + B < X_1(1{,}05)^n + X_1$; on conclut pour le déblai d'équilibre,

$$n = \frac{\log(X_1 - B) - \log(A - X_1)}{\log 1{,}05},$$

on trouve, pour $P = 3$ ou 4^f, $n = 42$ ans.

Avec le type de la ligne P. L. M. (hauteur de $5^m{,}50$ sous clef), on aurait $X_1 = 229 + 165P$ et la valeur de n s'abaisserait à 31 ans; avec celui de l'Orléans (hauteur de $5^m{,}20$ sous clef), on admettrait $X_1 = 219 + 158P$, on en conclurait $n = 26$.

En réalité, la valeur trouvée pour *n* devrait être sensiblement augmentée.

Nous avons supposé dans le calcul précédent que le second souterrain à percer ultérieurement à côté du premier coûterait, par mètre courant, le même prix que celui-ci. Cette hypothèse, à cause des difficultés de raccordement aux abords des têtes, se réalise rarement, surtout en pays de montagnes.

En voici quelques exemples :

Supposons qu'il existe un grand ouvrage aux abords des têtes du premier souterrain (le cas se présente pour les quatre souterrains à voie unique de notre arrondissement); soient E la distance des axes des têtes des deux souterrains, e l'écartement des axes des deux voies après le raccordement (soit $3^m{,}50$) et d la distance entre la tête du second souterrain et la culée de l'ouvrage. Supposons l'ouvrage et le premier tunnel dans le même alignement droit. Pour que le raccordement puisse s'effectuer sans élargir

au delà de 8 mètres de l'ouvrage existant, il faut satisfaire à la condition $d^2 \geqq 2R(E - e)$, R désignant le rayon du raccordement, E comprend deux fois la demi-largeur du souterrain aux naissances (soit 5 mètres), deux fois l'épaisseur du revêtement, qu'on augmente presque toujours aux abords des têtes (soit au moins 1 mètre), et celle d'une tranche de terrain suffisante pour éviter tout mouvement dans la première voûte. Nous admettrons 10 mètres comme limite inférieure de E; c'est la limite admise pour l'élargissement des souterrains de la ligne de Béziers à Millau, actuellement en cours d'exécution.

Pour $R = 300^m$, on trouve $d = 65^m$, nombre auquel il faut ajouter la demi-longueur du raccordement parabolique correspondant; soit 25 mètres, ce qui porte à 90 mètres la longueur totale du raccordement. Pour une distance moindre x, on devra élargir l'ouvrage d'une quantité z égale à la flèche de l'arc de raccordement, soit $\frac{[2R(E - e) - x^2]}{2R}$ augmentée du déplacement latéral m dû au raccordement parabolique. Pour $x = 20^m$, on aurait $z = 3^m,37 + 0^m,347 = 3^m,717$. Il faudrait dans ce cas, non pas élargir l'ouvrage existant, mais en construire un autre à côté du premier.

Supposons que le souterrain débouche sur le flanc d'un coteau escarpé; pour des terrassements, l'élargissement bilatéral est, dans ce cas, le seul admissible. Mais ici, il faut élargir soit du côté du thalweg, d'où construction de grands murs de soutènement, soit du côté de la montagne, d'où augmentation de longueur du souterrain et exécution à la sortie de travaux considérables de décapement et de consolidation de talus.

S'il traverse un contrefort séparant deux vallées secondaires, ou l'élargissement se fera du côté de la montagne et l'ouvrage sera plus long, ou il sera centrifuge, et si le thalweg de la vallée a une pente considérable, on peut être

obligé à la sortie, de construire au lieu d'un remblai, soit un viaduc, soit au moins de grands murs de bride.

On voit par ces exemples que, souvent, l'ajournement de la dépense fait plus que la doubler. La valeur trouvée pour n'est donc une limite inférieure qui sera rarement atteinte, et on pourrait admettre, qu'en général, quel que soit le délai de l'élargissement, il y a économie à adopter la solution mixte, qui présente en outre, au point de vue de l'exploitation, ce grand avantage qu'on aura, après l'élargissement, un souterrain à deux voies au lieu de deux souterrains à voie unique.

L'augmentation de dépense due à l'exécution partielle est de l'ordre des augmentations admises pour l'acquisition de terrains et de l'exécution des passages supérieurs pour deux voies.

L'augmentation absolue de dépense résultant de l'exécution partielle a pour valeur $A—X_1$, soit $16^f + 22P$ et l'augmentation relative $\frac{A-X_1}{X_1} = \frac{16+22P}{238+177P}$, soit 0,11 (pour $P=3$ et 4^f). Pour un souterrain percé dans du gneiss à 4 francs, ce serait un supplément de 104 francs à une dépense de 946 francs.

Or, sur les lignes à simple voie, l'administration prescrit l'acquisition des terrains et l'exécution des passages supérieurs pour deux voies. Pour les ponts supérieurs, la dépense de l'élargissement immédiat est précisément les $\frac{11}{100}$ de la dépense d'exécution à simple voie (*). Pour les terrains, elle est de 20 p. 100 environ (**), on la prescrit cependant, bien qu'à quelque vingt ans d'avance, il soit fort difficile de déterminer sans mécompte la position de l'élargissement ultérieur.

(*) Voir le mémoire de M. Nordling sur l'élargissement des chemins de fer à simple voie (*Annales*, 1862).

(**) Voir Cours de M. Sevène, p. 154.

Si l'on accepte ces deux augmentations, qui sont toutes deux sans utilité immédiate et dont la dernière peut être à refaire au moment de l'élargissement, il est logique d'accepter également celle due à l'exécution partielle à deux voies qui, en permettant d'augmenter de $8^{mq},30$ la surface de vide, présente des avantages immédiats pour l'aérage, la circulation des agents, les réparations, etc., et qui permet de réserver l'avenir en ne supportant pour le présent qu'une charge insignifiante. Remarquons enfin que pour un accroissement de dépense de $16^f + 22P$, nous obtenons un accroissement de vide de $8^{mq},30$, tandis qu'en portant de $5^m,50$ à 6 mètres la hauteur sous clef pour un souterrain à une voie, nous avions payé $9^f + 11P$ un accroissement de vide de $2^m,35$.

Avec les éléments que nous avons indiqués, on calculerait facilement les valeurs de A, B, X_2 pour le cas d'un revêtement de $0^m,60$, et on reconnaîtrait que dans ce cas, les conclusions précédentes peuvent être maintenues.

Cas des souterrains percés avec puits.

Pour des souterrains percés à l'aide de puits, la différence $A - X_1$ augmenterait, car la plus-value par mètre courant pour montage des déblais par les puits varie proportionnellement au cube à évacuer qui est de $42^{mq},22$ pour le type mixte A, et de $35^{mq},4$ seulement pour le type 1 à voie unique.

De plus, les puits percés pour le premier souterrain et qu'on aura eu soin de ne pas combler pour assurer l'aérage, serviront au percement du second, dont le prix par mètre courant sera alors diminué d'autant : N diminuera pour ces deux motifs d'une quantité qui dépendra du nombre et de la longueur des puits, et telle, dans certains cas, que nos conclusions ne puissent être maintenues.

Conclusion.

En résumé, nous pensons qu'on devra adopter le système mixte pour tous les souterrains ouverts seulement par les têtes, percés dans un terrain solide qui puisse se maintenir sans radier, et faisant partie de tronçons pour lesquels auront été prescrites pour deux voies l'acquisition des terrains et l'exécution des passages supérieurs.

Quant aux autres lignes qui ne doivent jamais être élargies, il y aurait lieu de n'appliquer le type à 6 mètres de hauteur sous clef qu'aux longs souterrains à forte rampe, celui de $5^{m},20$ aux très-petits souterrains exploités à simple traction, et celui de $5^{m},50$ à tous les autres. Comme nous l'avons dit plus haut, il est logique d'appliquer dans chaque cas le type le plus économique que l'expérience a montré pouvoir être appliqué sans danger, et de n'accepter la dépense due au supplément de hauteur que dans les cas seulement où elle est justifiée par la nécessité d'assurer l'aérage.

Mende, 18 novembre 1878.

ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES.

CHRONIQUE.

Décembre 1879.

N° 64

NOTE
SUR
LES PLOMBAGES DES SACS DE CHAUX ET CIMENTS

Par M. CHEMIN, ingénieur des ponts et chaussées.

Les ingénieurs ont souvent besoin d'employer des chaux ou des ciments de provenance éloignée et par suite d'un prix de revient assez élevé; et comme ces matières sont en général réservées pour des travaux délicats ou difficiles, ils ont cherché à s'entourer de toutes les garanties possibles pour être certains de leur provenance exacte et de leur état de conservation au moment de leur mise en œuvre. Les fabricants soucieux de la bonne renommée de leurs usines se prêtent, il faut se hâter de le dire, à tous les moyens de contrôle qu'on peut exiger d'eux ; mais les entrepreneurs, pressés par la nécessité ou poussés par l'appât du gain, se laissent quelquefois aller à des manœuvres répréhensibles sur lesquelles il paraît indispensable d'appeler l'attention.

Les chaux et ciments, expédiés le plus ordinairement à l'état pulvérulent, sont enfermés soit dans des barils, soit dans des sacs qu'on plombe avant leur sortie de l'usine. Quand on emploie les barils, il y a peu d'avaries à craindre en route ; les précautions les plus simples suffisent pour empêcher la détérioration des produits qu'ils renferment ; enfin il est bien facile de vérifier si ces

barils sont intacts et leur ouverture s'accuse par des signes trop apparents pour qu'on puisse s'y tromper, et que les entrepreneurs ou leurs agents osent s'y risquer.

Il en est tout autrement pour les chaux et ciments transportés en sacs; la perméabilité des toiles les expose à l'humidité et, si l'on n'y apporte les plus grands soins, ces matières s'éventent assez vite ou se prennent en masses, quand elles ont été mouillées, et par suite deviennent tout à fait impropres à être employées.

En dehors des essais réglementaires qui doivent se faire régulièrement sur tous les chantiers, mais qui ne peuvent évidemment pas être effectués pour chaque sac en particulier, la seule garantie qu'aient les agents de l'administration, c'est le plombage qui doit empêcher l'ouverture des sacs et prévenir les mélanges et les remaniements de leur contenu.

Un jeune ingénieur, M. Debray, vient de signaler tout récemment les fraudes que ce moyen de scellement, considéré jusqu'ici comme excellent, permet encore quand il est mal appliqué. Comme des faits analogues peuvent se produire un peu partout, malgré la surveillance qu'on exerce, il est bon d'entrer dans quelques détails sur la manière dont ils se commettent et sur les moyens qu'on pourrait adopter pour en empêcher le retour.

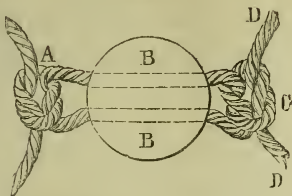
Le plombage d'un récipient, dont la fermeture se fait au moyen d'une corde, consiste à réunir les deux extrémités de cette corde sous un disque ou enveloppe de plomb, appelé *flan*. Un instrument spécial, appelé *pince*, imprime une marque déterminée sur chacune des faces, en comprimant le plomb et la corde de telle manière qu'on ne puisse rendre libres les bouts de cette dernière qu'en les coupant en avant du flan et par suite en laissant une trace indiscutable de cette opération.

Pour que le plombage offre toutes les garanties désirables, il faut donc 1° que la corde soit d'un seul morceau; 2° qu'elle soit passée dans les sacs ou les colis de manière qu'on ne puisse la détacher sans la couper.

Or ces conditions sont bien loin d'être remplies dans les plombages effectués par la plupart des maisons qui fournissent les chaux et les ciments. Les industriels paraissent n'y attacher qu'une importance assez médiocre et se tiennent pour satisfaits quand leurs noms ou les marques distinctives de leurs usines ressortent bien nettement sur les empreintes laissées par les mâchoires de la pince. Cela est bien insuffisant, et les faits observés par M. Debray sont là pour le prouver. Ils se rapportent à des sacs de ciment fournis par la maison Famchon et à des sacs de chaux de Beffes.

Pour les premiers, les plis supérieurs au moment de la fermeture sont réunis par une corde fortement serrées et arrêtée par un nœud A, comme le représente la *fig.* 1.

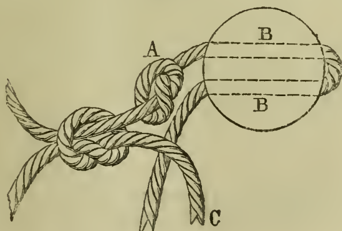
Fig. 1.



Les deux bouts sont ensuite passés dans deux trous B, B ménagés dans la partie centrale du flan ; puis ils sont réunis à leur sortie en un autre nœud C. Le flan reçoit alors la pression de la pince, qui imprime sur le plomb la marque de la maison et comprime le métal tout autour de la corde. Le but du plombage est-il atteint de cette manière ? Évidemment non ; et il est bien aisé d'ouvrir le sac sans couper la corde. Il suffit en effet de dénouer le nœud C et d'élargir tant soit peu les trous B, au moyen d'un poinçon fin, pour que la corde puisse échapper du flan. Avec un pen de soin, cette opération se fera couramment sans qu'il en reste de traces visibles sur le plomb. C'est du reste ainsi que s'est produite la fraude constatée par M. Debray. Quelle garantie reste-t-il alors de la qualité des produits ? Aucune, cela est certain.

Pour la chaux de Beffes, le plombage se présente d'une manière différente, mais tout aussi défectueuse. Autant qu'on en peut juger, il s'effectue de la manière suivante (*fig.* 2). Les plis du sac sont serrés par un nœud coulant qu'on arrête au moyen d'un nœud A pratiqué sur le bout libre. Celui-ci est ensuite passé dans les deux trous B, B puis lié au brin C. Le plombage en tant que

Fig. 2.

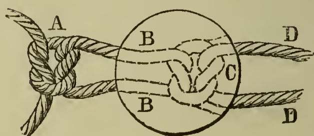


contrôle de fermeture n'a même plus sa raison d'être ici. Le

flan n'est plus qu'une étiquette un peu plus résistante qu'une autre, et voilà tout. Il serait évidemment fort simple de remédier aux défauts que nous signalons, et les moyens ne manquent pas.

Il existe dans le commerce des flans où l'espace compris entre les deux trous B est évidé jusqu'au centre. Le nœud C de la *fig.* 1 peut être introduit tout entier dans le vide ainsi ménagé, de manière à ne laisser passer que les deux bouts D, D (*fig.* 3). La pres-

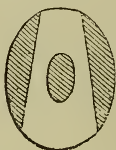
Fig. 3.



sion exercée au moyen de la pince réunit les deux bords de l'ouverture et emprisonne complétement au milieu du plomb le nœud C, qu'on ne peut plus atteindre sans déchirer le métal qui le recouvre, et par suite sans laisser de traces de l'opération.

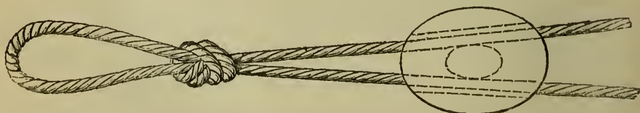
On pourrait aussi procéder comme l'administration des contributions indirectes l'a prescrit pour le plombage des sacs de sucre indigène. Les flans de forme un peu oblongue sont évidés intérieurement comme l'indique la *fig.* 4. Après avoir fait le premier nœud qui serre les plis du sac, on en fait un ou deux autres pour

Fig. 4.



isoler le plomb et on coupe les deux bouts, à une longueur de 10 centimètres environ, en faisant les sections en sifflet pour faciliter le passage de la corde dans le flan. On introduit celle-ci par la petite ouverture du flan, en ayant soin que les bouts passent l'un à droite et l'autre à gauche, et sans engager la corde jusqu'au nœud (*fig.* 5). On fait ensuite repasser la corde en sens inverse

Fig. 5.



par la grande ouverture, de manière que les bouts se croisent en appuyant sur la séparation intérieure du flan (*fig*. 6, 7 et 8). Après

Fig. 6.

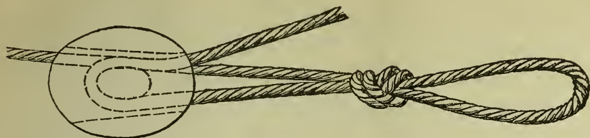
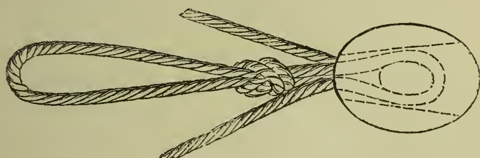


Fig. 7.



Fig. 8.



quoi, il n'y a plus qu'à tirer les deux bouts afin de rapprocher le flan du nœud, puis achever l'opération avec la pince. On a de la sorte un plombage qu'il est impossible de défaire sans laisser de traces. Cette pratique n'a rien de nouveau ; car elle est ordonnée par une circulaire du 17 août 1843 et a été constamment appliquée depuis.

Il y a lieu de s'étonner d'après cela que les industriels n'aient pas adopté l'une ou l'autre de ces manières de faire, ou toute autre similaire qui donnerait une fermeture sur l'efficacité de laquelle on puisse compter absolument. Leur intérêt y est engagé ; car les agents de l'administration, voyant des sacs dont le plombage paraît intact, doivent tout naturellement supposer que les matières qu'ils contiennent sont bien celles qui sortent de l'usine et qu'elles n'ont subi ni mélange ni préparation nouvelle. Si par suite de fraudes qu'ils n'auront pu découvrir, les résultats obtenus sont mauvais, c'est à la préparation défectueuse des produits et à leur mauvaise qualité qu'ils les attribueront, et il ne faudra pas plus de deux ou trois insuccès de cette nature, sur des travaux un peu en vue, pour discréditer une marque jusque là réputée bonne.

Avertis des supercheries auxquelles un peu de négligence de leur part donne naissance, les fabricants jaloux de la réputation de leurs produits feront, nous n'en doutons pas, tout ce qui sera nécessaire pour que des faits pareils ne puissent plus se produire. De leur côté les ingénieurs et leurs agents se montreront plus sévères pour les produits venant de loin ; ils exigeront des plombages efficaces exécutés d'après des types donnés ; ils pourront enfin refuser les fournitures qui ne satisferaient pas à ces conditions, et sur la pureté et l'état desquels il pourrait par suite rester quelques doutes.

Nous n'insisterons pas davantage sur ce sujet, il suffira d'avoir signalé les points défectueux pour qu'il y soit promptement remédié.

Nouvelle machine de tramways à cylindres combinés. — On sait que l'application de la locomotive plus ou moins modifiée à la traction des cars de tramways est une des questions à l'ordre du jour. Plusieurs machines produisant directement la vapeur nécessaire à leur fonctionnement ont été essayées, aussi bien en France qu'à l'étranger.

MM. Black, Hawthorn et Cie, de Gateshead-on-Tyne, viennent de construire un nouveau type de remorqueur dont les dispositions paraissent à signaler, notamment en ce qui touche la condensation de la vapeur expulsée des cylindres. Les détails qui suivent sont empruntés à l'*Engineering*.

La machine en question appartient à la classe des locomotives ordinaires pour ce qui concerne la chaudière, la position des cylindres et le mode de transmission du mouvement aux roues motrices. Elle en diffère toutefois en ce qu'elle est du système compound, ou à cylindres combinés, comme celle que M. Holt a spécialement construite pour les tramways. Les cylindres ont respectivement $0^{m},178$ et $0^{m},305$ de diamètre et la course des pistons est de $0^{m},254$. Le mouvement est directement transmis à l'essieu coudé et la vapeur peut être admise simultanément, et à haute pression, dans les deux cylindres quand on le juge nécessaire, notamment pour le démarrage. La chaudière et le foyer sont semblables à ceux des locomotives ordinaires; le foyer est en cuivre et les tubes de la chaudière en laiton. Pour les chaudières qu'on construira à l'avenir, on doit employer exclusivement l'acier. Dans une de celles dont il est ici question, la surface totale de chauffe est d'environ 14 mètres carrés.

Un des traits caractéristiques du nouveau système est le condenseur. Il se compose en premier lieu d'une bâche ayant à peu près la forme d'une boîte plate, longue de $1^{m},37$ qui aurait été recourbée de manière à épouser la forme du haut de la chaudière et à reposer sur cette dernière. De chaque partie latérale de la bâche partent deux appendices verticaux ou ailes. Ce sont aussi des espèces de boîtes verticales plates, hautes de $1^{m},06$, longues de la quantité $1^{m},37$, indiquée précédemment, et dont l'épaisseur dans le sens perpendiculaire à l'axe de la machine est à peu près égale à celle de la boîte courbe qui repose sur la chaudière, c'est-à-dire à $0^{m},15$. La largeur du système ainsi constituée, prise entre les faces verticales extérieures des ailes, est d'environ $1^{m},52$. Comme la profondeur ou l'épaisseur de ces dernières est de $0^{m},15$, on voit que leurs faces verticales intérieures laissent entre elles un espace vide d'environ $1^{m},22$. Cet espace est rempli d'un très-grand nombre de tubes horizontaux, de $0^{m},025$ de diamètre, qui réunissent les deux ailes et établissent la communication entre elles; de telle sorte que quand tout le système est rempli d'eau, ce liquide peut circuler de l'une à l'autre en traversant ces tubes. La circulation peut aussi s'effectuer par le moyen d'un tuyau qui, partant du fond d'une des ailes, passe sous la chaudière et vient aboutir au fond de l'autre. Le tuyau qui sert à évacuer la vapeur sortant du cylindre à basse pression vient s'embrancher sur le précédent, immédiatement avant son entrée dans la bâche; une soupape empêche l'eau contenue dans cette dernière de pénétrer dans le cylindre.

Tout le système est rempli d'eau froide au début. Quand la machine est en mouvement, la vapeur expulsée du cylindre ouvre de force la soupape et s'échappe par le fond de la bâche; elle se divise et se distribue dans la masse liquide par le moyen de cônes placés dans le condenseur et qui sont destinés à l'envoyer dans toutes les directions. L'eau du condenseur, échauffée par la chaleur latente que la vapeur lui cède, se met bientôt à circuler activement dans tout le système. Les couches plus chaudes et moins denses montent à la partie supérieure et traversent les tubes horizontaux; elles s'y refroidissent, passent dans l'autre aile, puis font retour à la première par le large tuyau qui met ces deux parties en communication en passant en dessous de la chaudière, comme on l'a déjà indiqué plus haut. La vapeur, comme on le voit, est condensée par l'eau contenue dans le système; et les tubes horizontaux ont pour objet de refroidir cette eau échauffée par la vapeur condensée. Ils produisent un très-grand effet, spécialement

quand la machine est en mouvement et, d'après l'expérience qu'on a déjà pu en avoir, ce système laisse peu à désirer.

La forme et les dispositions générales de l'ensemble n'ont rien de bien particulier qui mérite de fixer l'attention. Les roues, au nombre de quatre, sont en acier; elles ont $0^m,61$ de diamètre; elles sont couplées et leurs essieux sont distants de $1^m,22$ d'axe en axe. La machine est munie d'un frein à vapeur et d'un frein à main. Elle peut marcher dans les deux sens et être conduite indifférem-ment de l'une ou l'autre de ses extrémités. A cet effet, une plate-forme permet de circuler tout autour et les appareils de manœuvre et d'arrêt sont en double.

La machine dont nous nous occupons ici pèse 7.700 kilog. en état de service. Elle a fait à Gateshead-on-Tyne l'objet d'essais intéressants. Dans une expérience publique, qui a eu lieu tout dernièrement, on aurait constaté qu'elle pouvait mener aisément deux cars sur des rampes de $0^m,05$ par mètre; que marchant à la vitesse d'environ 10 kilomètres à l'heure, elle pouvait être arrêtée avec le frein à main sur une longueur de 3 mètres. On indique que sa consommation en combustible est comprise entre 200 et 255 kilog. (4 à 5 cwt) de coke par journée de 12 heures, soit environ 17 à 21 kilog. à l'heure (ces chiffres paraissent hors de proportion tant avec la surface de chauffe qu'avec les dimensions du mécanisme et la vitesse de marche). On aurait aussi constaté qu'elle fonctionne sans bruit, qu'elle n'émet pas de vapeur et que le condenseur peut agir efficacement pendant quatre heures et demie sans que la température de l'eau y dépasse 80°. A la fin de cette période, on a trouvé qu'il convenait de renouveler partiellement l'eau de ce condenseur pour éviter l'émission de la vapeur au dehors.

Quels que soient les résultats constatés dans cette expérience, avant de se prononcer avec quelque certitude sur la valeur de ce nouveau type de locomotive au point de vue mécanique et économique, il paraît prudent d'attendre qu'elle ait fait un service régulier pendant un temps assez long.

O. C.

TABLES

DES MÉMOIRES ET DOCUMENTS

PUBLIÉS

DURANT LE 2[me] SEMESTRE DE 1879.

PREMIÈRE TABLE.

RÉCAPITULATION DES ARTICLES PAR ORDRE D'INSERTION.

DEUXIÈME TABLE.

ANALYSE DES MATIÈRES PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE.

FIN DES TABLES DES MÉMOIRES DU 2me SEMESTRE DE 1879.

Paris. — Imprimerie Arnous de Rivière, rue Racine, 26.

Fig 1 Ligne de Rigi Kaltbad à Rigi-Scheideck

Fig 2 Ligne de l'Uetliberg

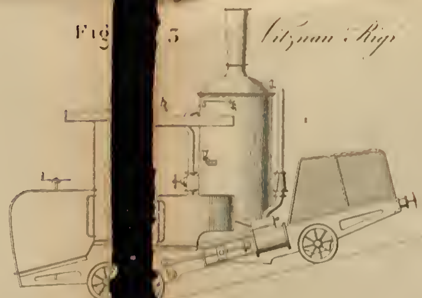


Fig 3 Vitznau Rigi

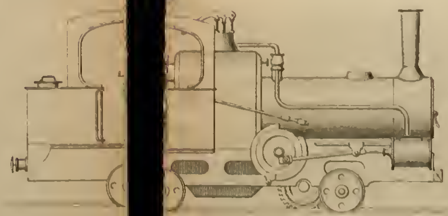


Fig 4 Kahlenberg

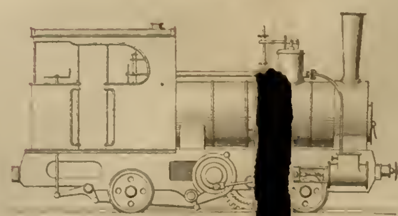


Fig 5 Schwabenberg

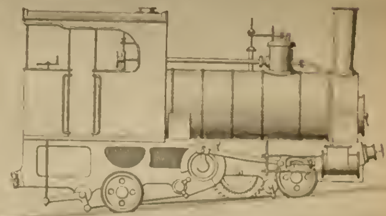


Fig 6 Arth

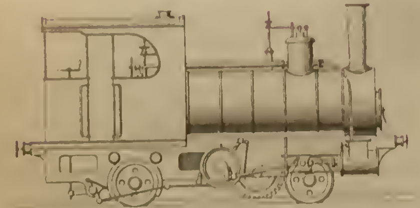


Fig 7 Rorschach Heiden

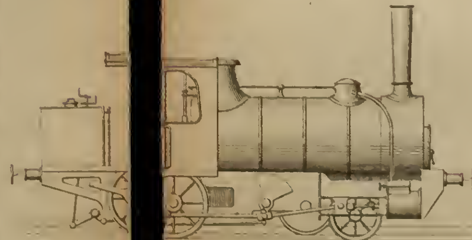


Fig 8 Ostermundingen I

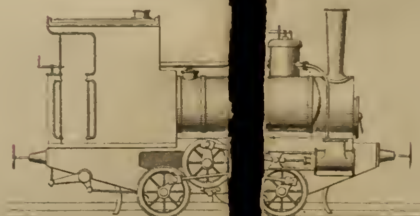


Fig 9 Ostermundingen II

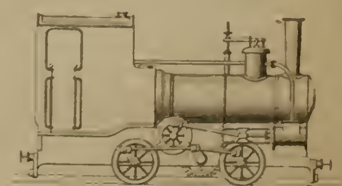


Fig 10 Wasseralfingen

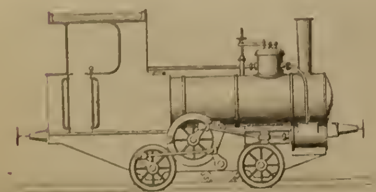


Fig 11 Rüti

Gravé par E. Pérot

Fig. 1

Profil en long

d'une tranchée d'une levée

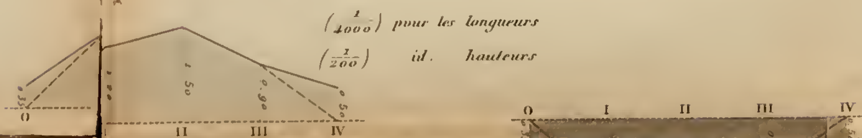
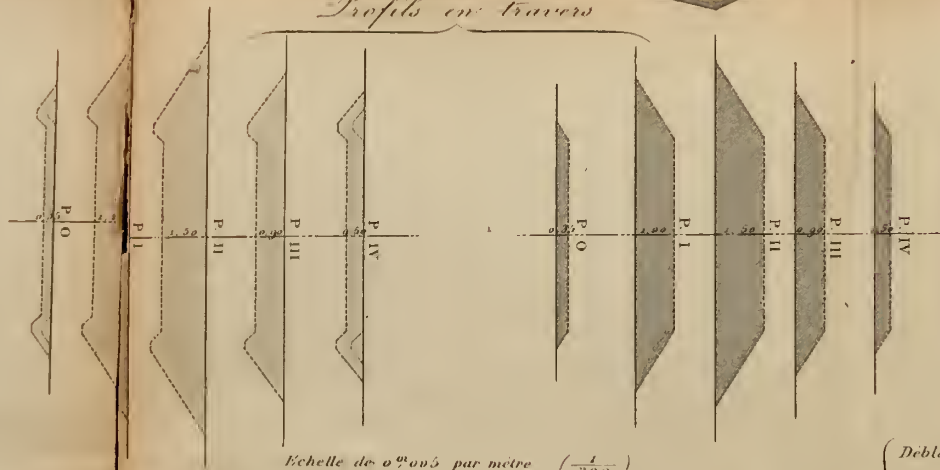


Fig. 2

Profils en travers



Echelle de 0m,005 par mètre ($\frac{1}{200}$)

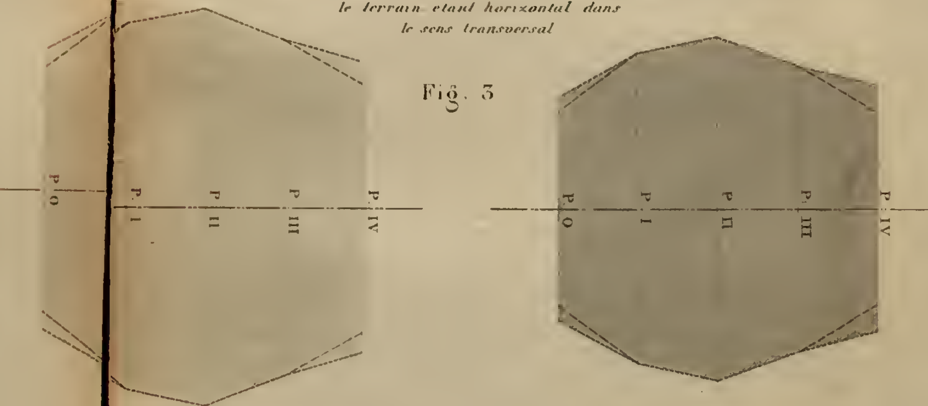
Parties en: Deblai, Remblai

Emprises

de la tranchée de la levée

le terrain étant horizontal dans le sens transversal

Fig. 3



Echelles: des longueurs 0m025 pour 100 mètres ($\frac{1}{4000}$); des largeurs 0m005 par mètre ($\frac{1}{200}$)

Chemins de l'État

Ligne de Mayenne à Fougères

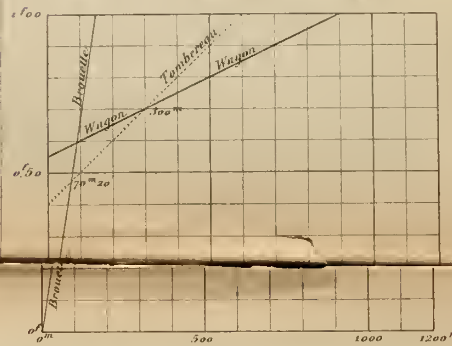


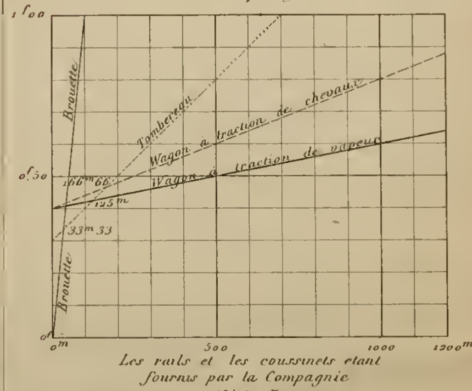
Fig. 4

Echelle de $\frac{1}{20000}$ (0m005 par 100m) pour les distances

id $\frac{1}{20}$ (0m05 par franc) pour les prix

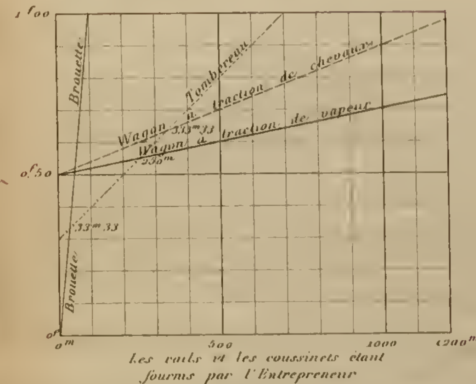
N.B. Les figures 4 à 8 indiquent les ... modes de transport

Compagnie des chemins de fer de l'Ouest



Les rails et les coussinets étant fournis par la Compagnie

Fig. 5

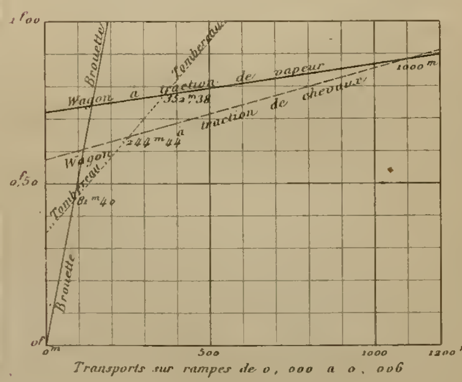


Les rails et les coussinets étant fournis par l'Entrepreneur

Fig. 6

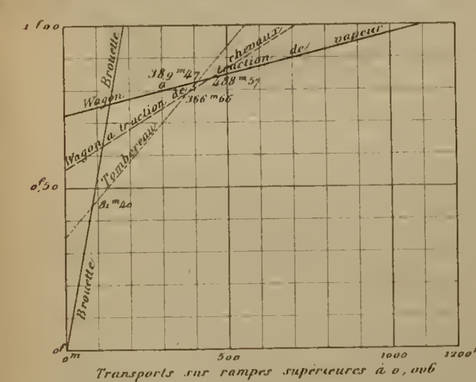
Compagnie des chemins de fer du Nord

Terrassements à exécuter dans les départements du Nord, de la Somme, de l'Oise et de l'Aisne



Transports sur rampes de 0,000 à 0,006

Fig. 7.

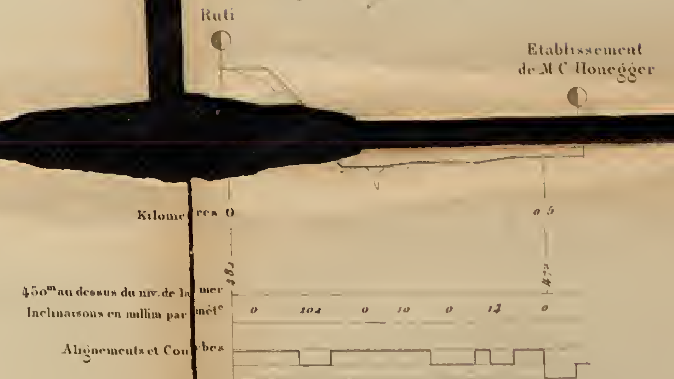


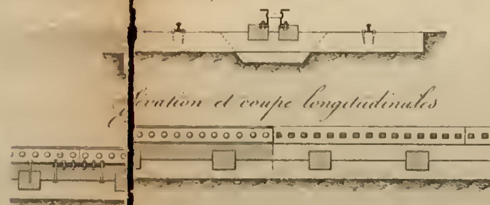
Transports sur rampes supérieures à 0,006

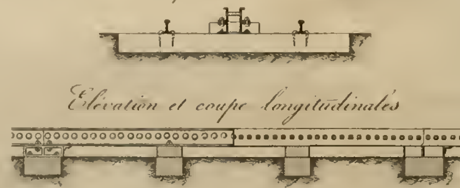
Fig. 8

Gravé par E. Pérot

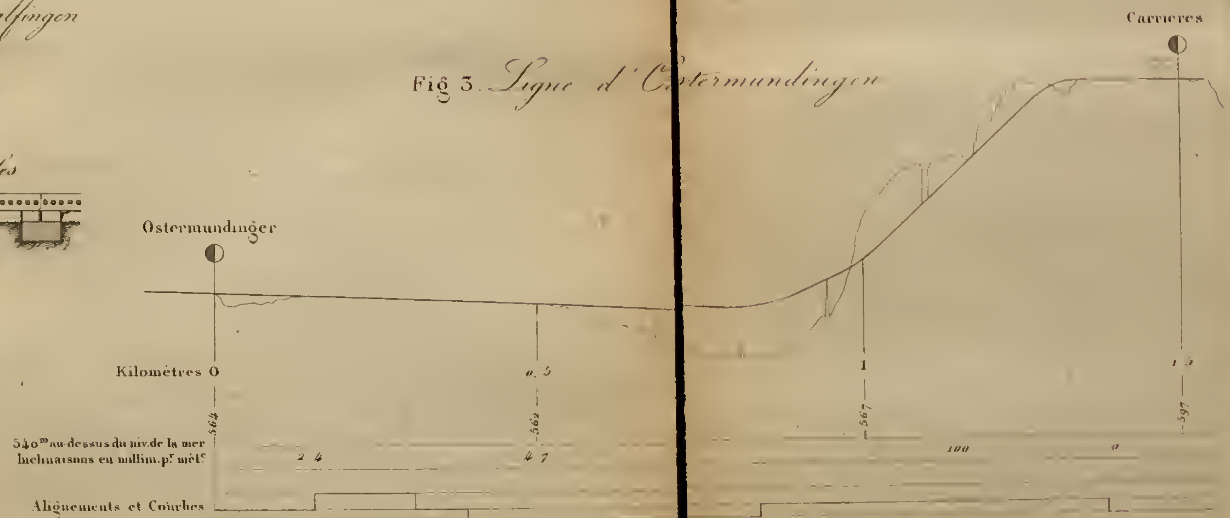












Gravé par E. Perot

Fig. 1. *Représentation graphique des opérations que comporte la rédaction du tableau du mouvement des terres*

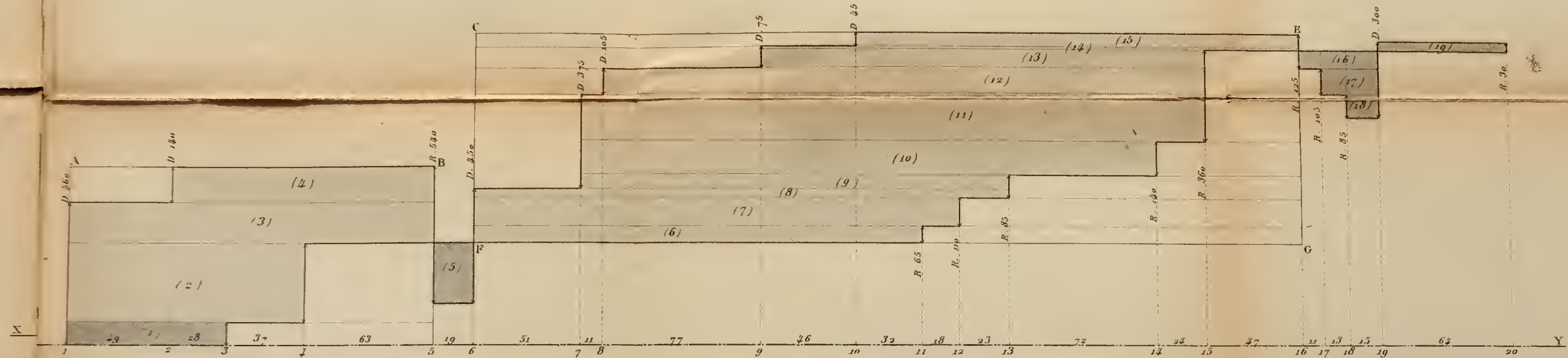
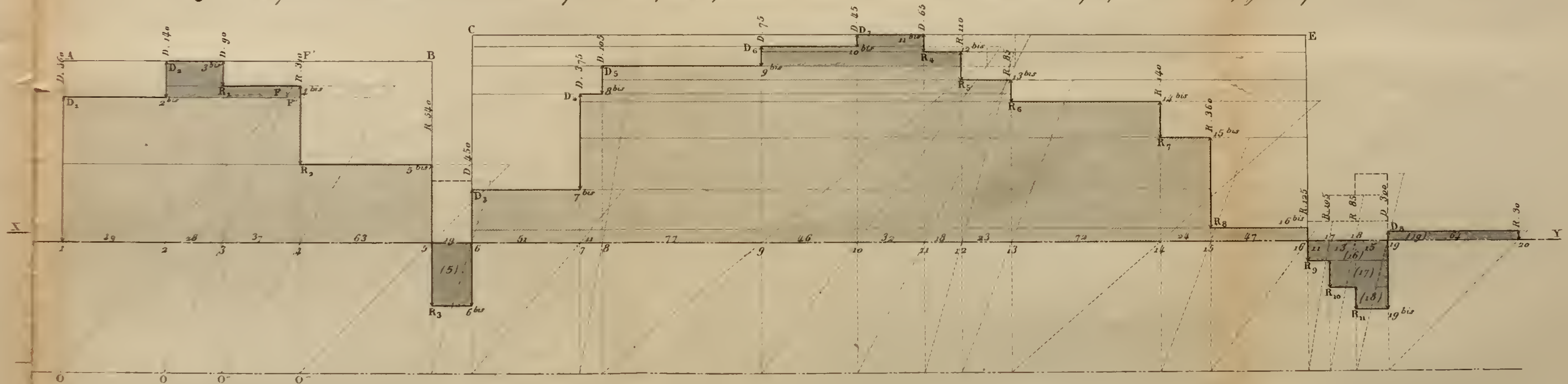
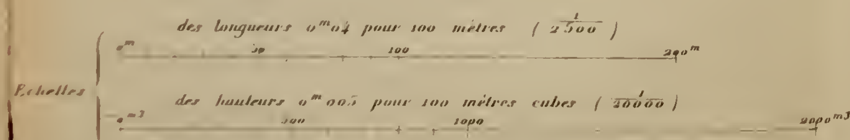


Fig. 2. *Disposition des données de la question qui reproduit dans un autre ordre les superficies de la figure précédente*





Transports au tombereau

id. à la brouette

Annales des Ponts et Chaussées

Gravé par E. Perot

Fig. 1. Types de raccordements

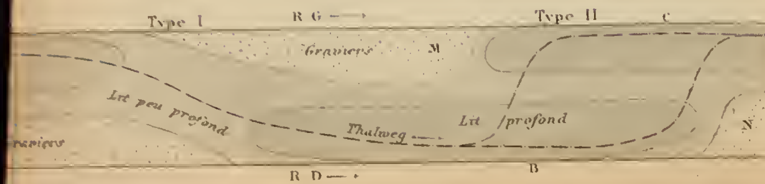


Fig. 8.



Fig. 9.

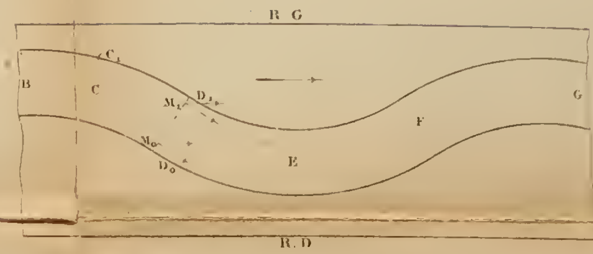


Fig. 2

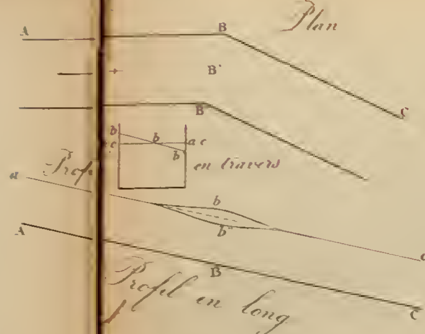


Fig. 3

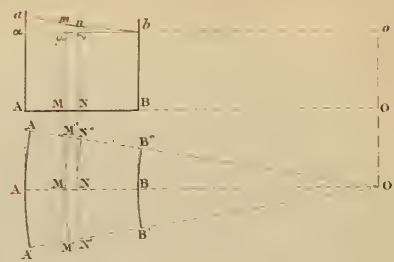


Fig. 10

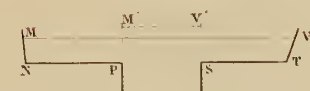


Fig. 11.

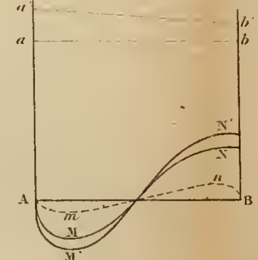


Fig. 12.

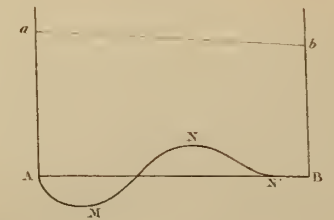


Fig. 4

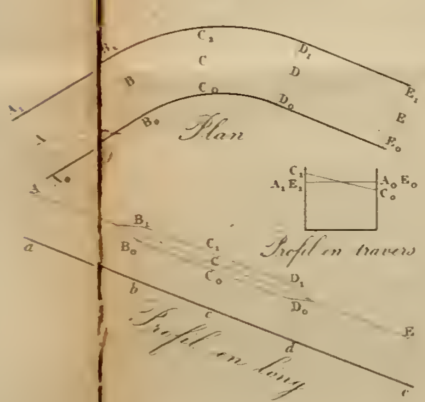


Fig. 5.

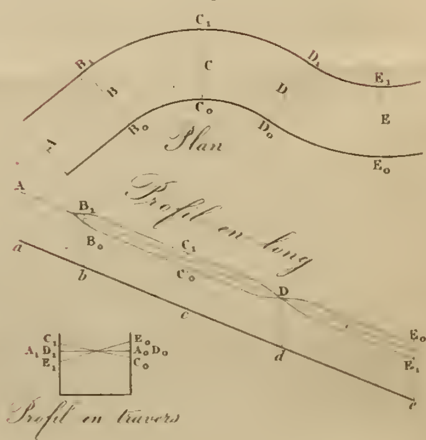


Fig. 13

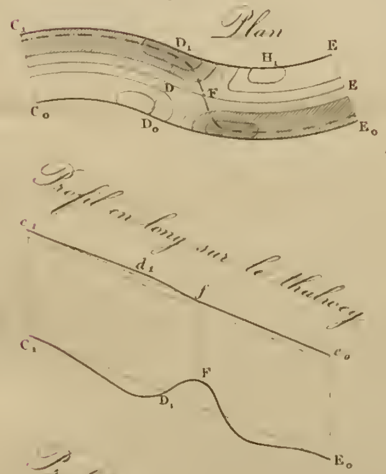


Fig. 14.

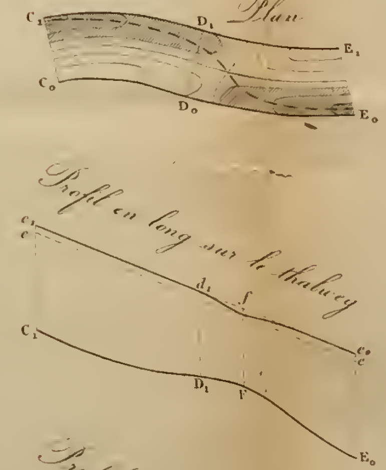


Fig. 15.

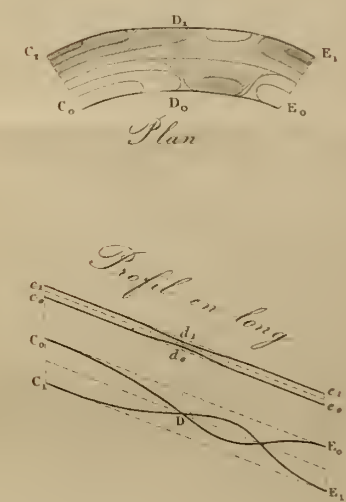


Fig. 6

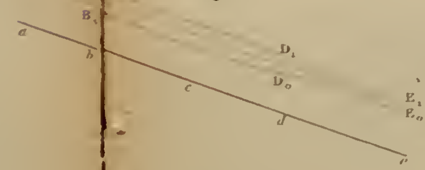
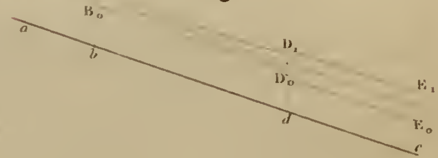


Fig. 7



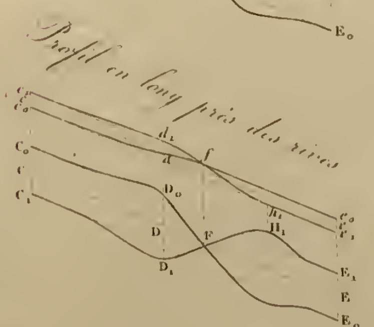
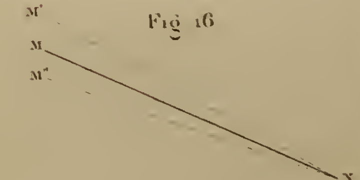


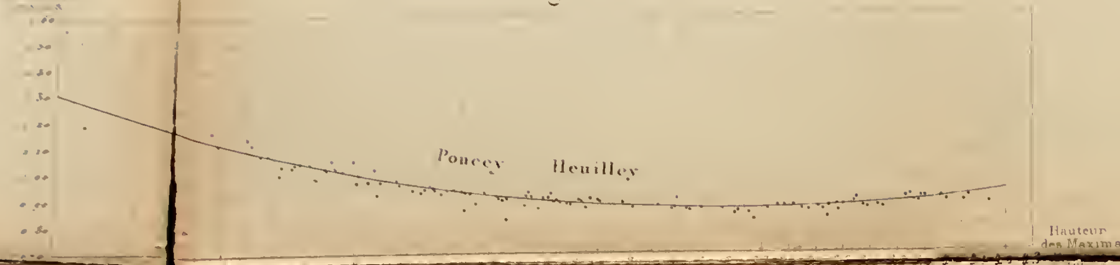


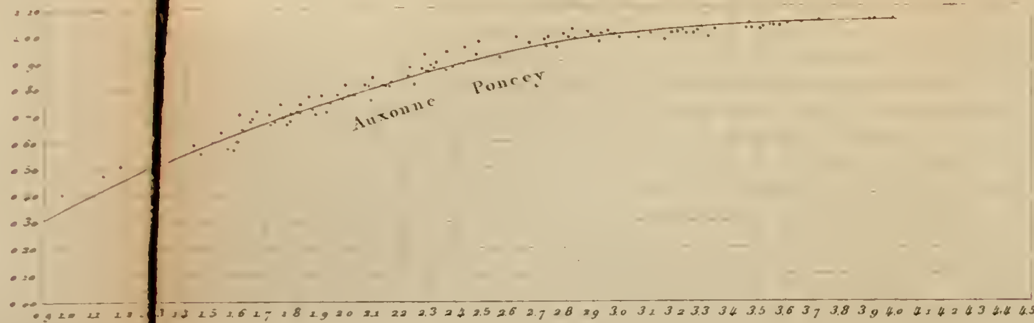
Fig. 16

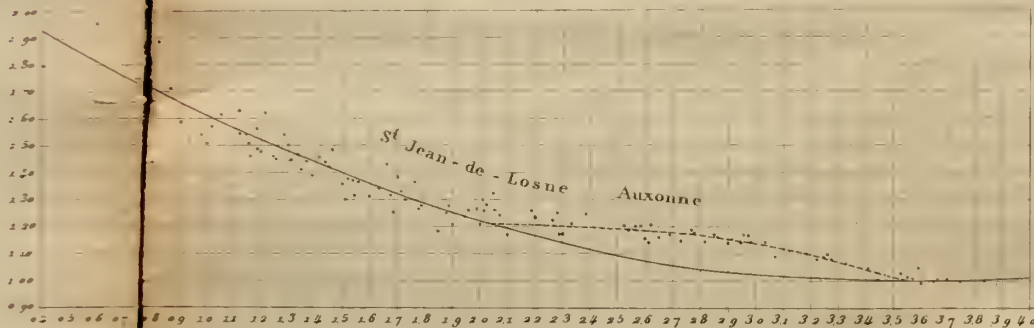


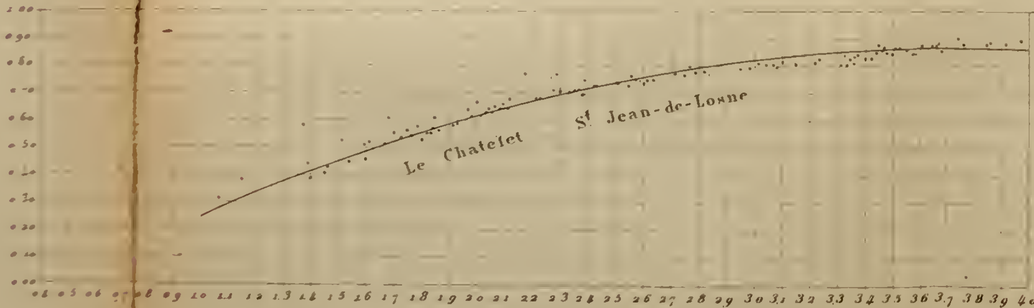
Gravé par E. Perot

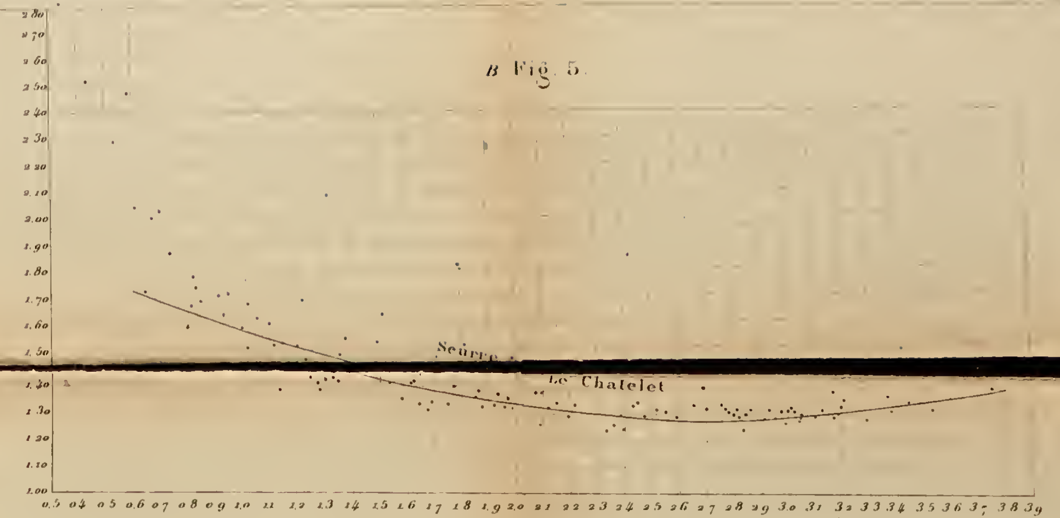
Courbes des coefficients de crues











A Fig. 6. *Carte du bassin de la Saône supre*



● *Position des udomètres*

- - - - - - - - - - - - *Limites des bassins secondaires*

+ + + + + + + + + + + *Limite du bassin considéré*

Echelle A de 0m001 pour 1km

0 10 20 30 40 50m

Echelle B de 0m04 pour 1m

0 10 20 30 40 50 1m

Fig. 7. *Courbes du rapport entre le volume d'eau tombé sur le bassin de la Saône à Savoyeux et celui débité par la rivière*

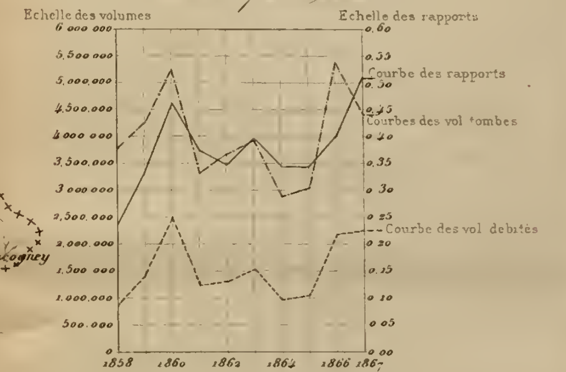
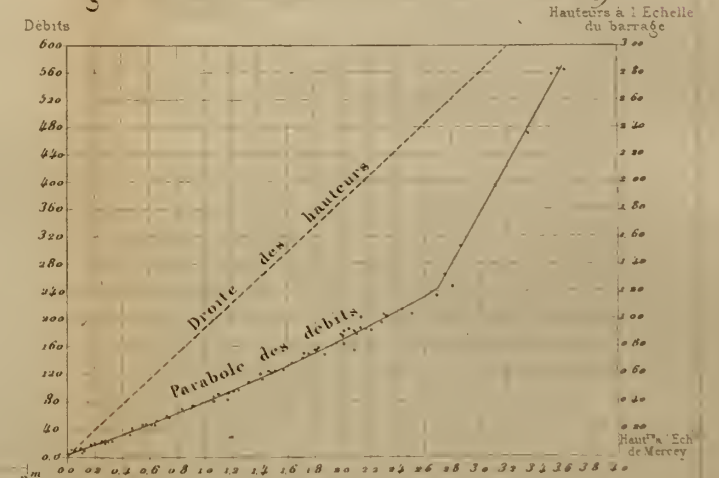
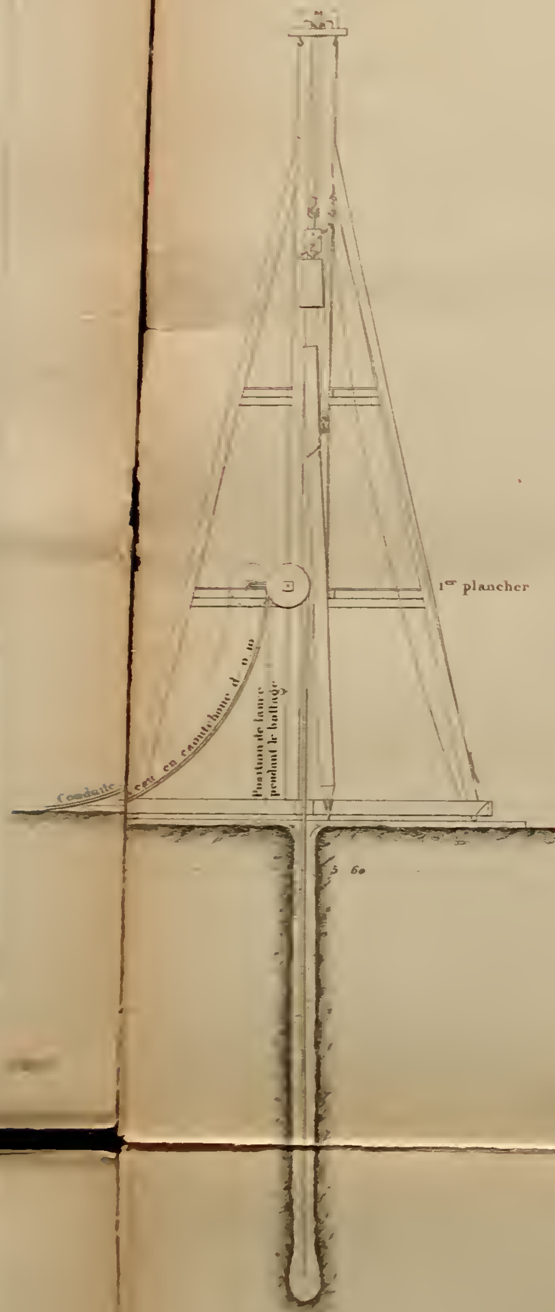
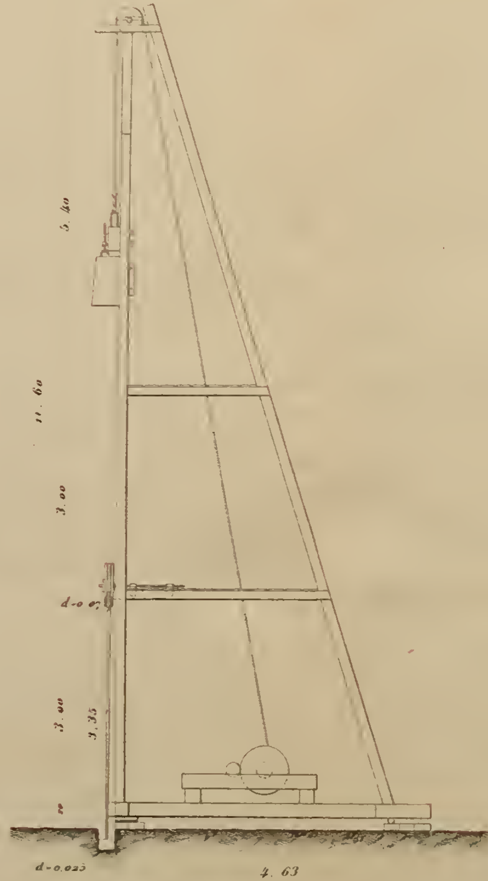


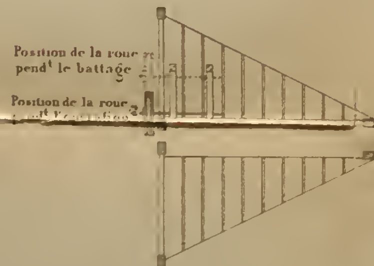
Fig. 8. *Courbes des débits de la Saône à Mercey*



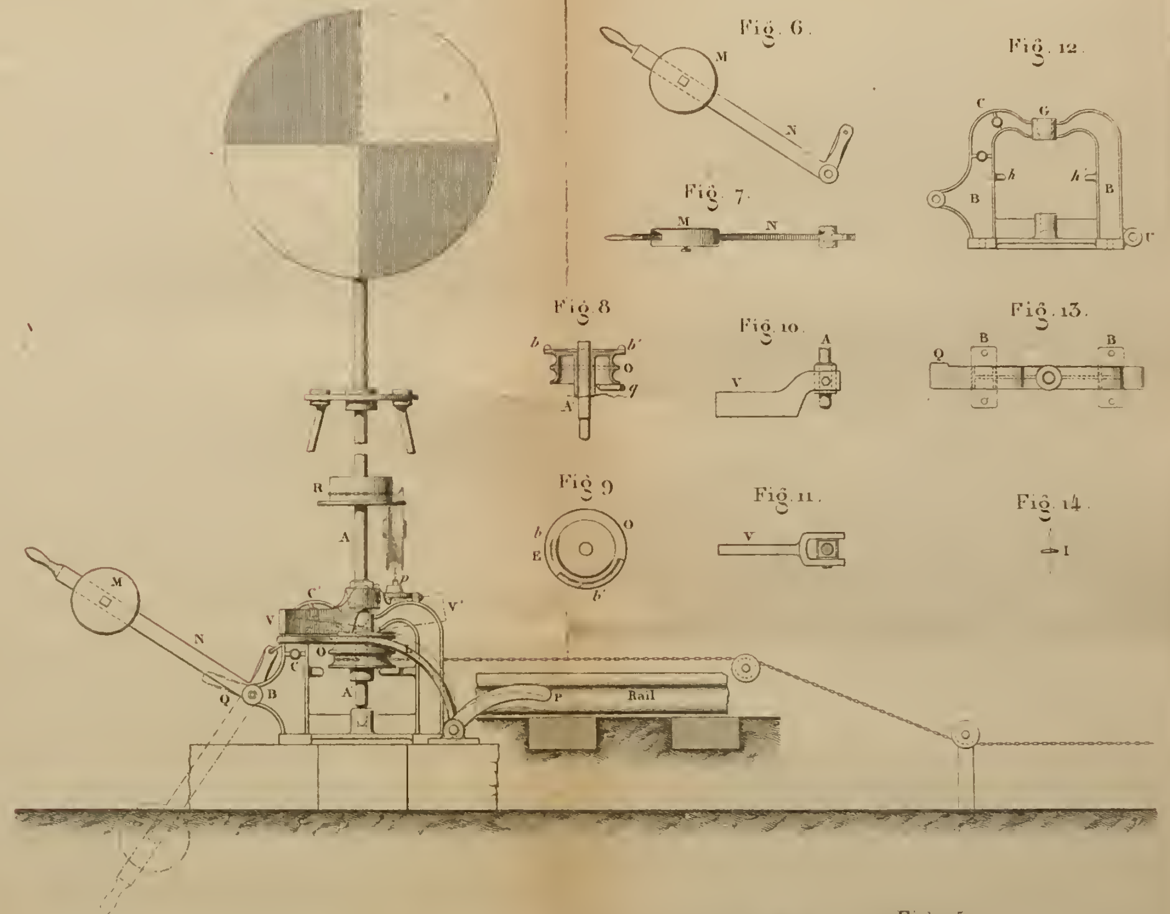
Élévation de la Sonnette

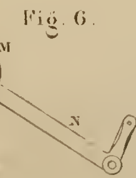


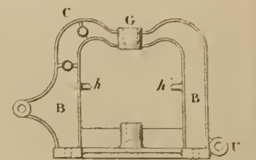




Signal avertisseur système Moreaux

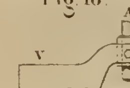










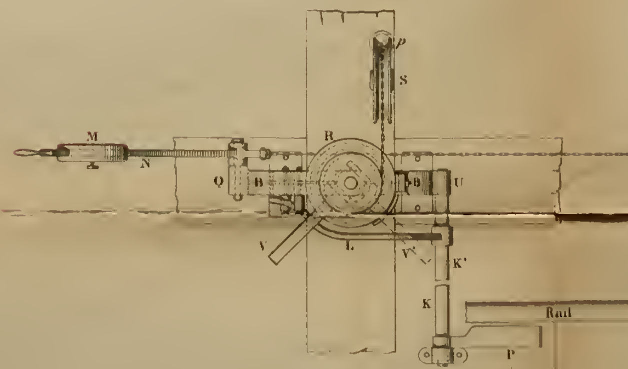


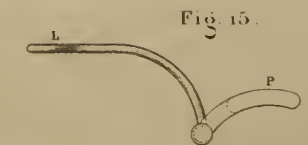


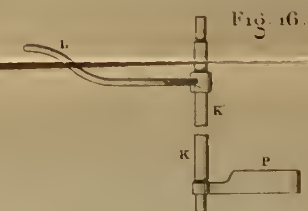












Echelle de 0m 01 pour 1m

Echelle de 0m 05 pour 1m

Gravé par E. Perot



Fig. 1. Élévation

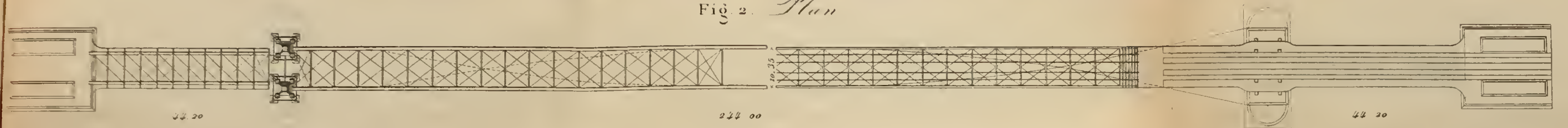
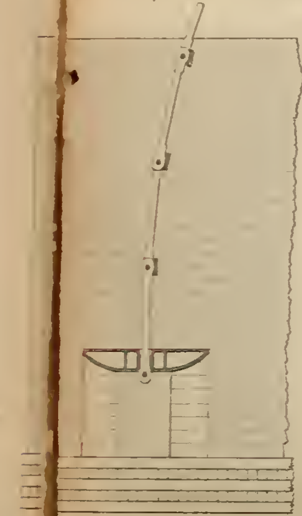


Fig. 2. Plan



Ancrage

Fig. 3. Massif d'ancrage



Fig. 4. Plan de la plaque d'ancrage

Fig. 5. Coupe



Fig. 6. Élévation des tours

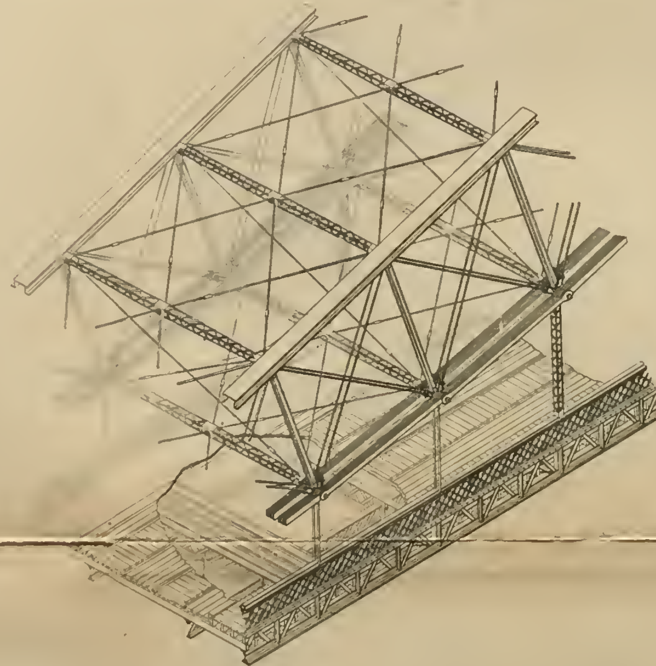


Fig. 7. Vue perspective du système de suspension

Selles au sommet des tours

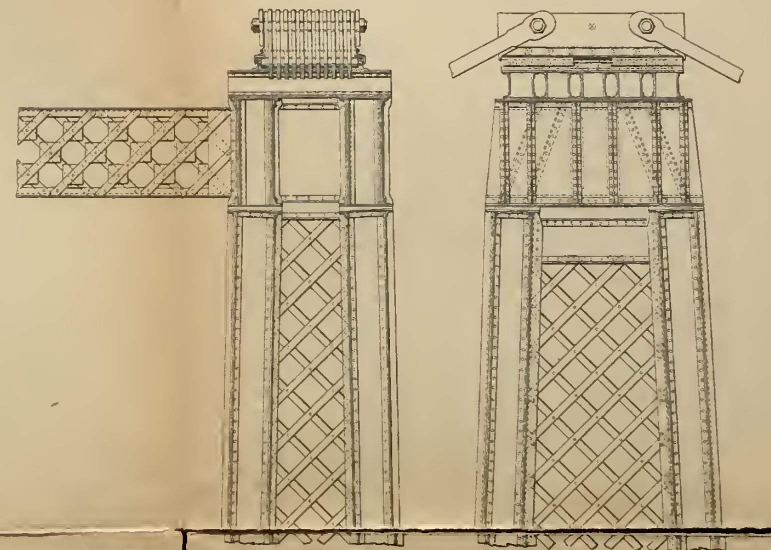


Fig. 8. Élévation transversale

Fig. 10. Élévation latérale

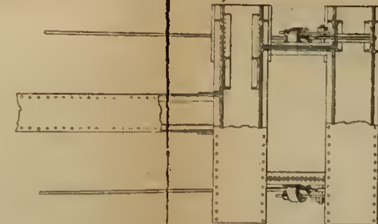


Fig. 9. Vue par dessus

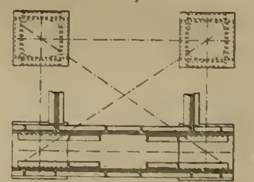
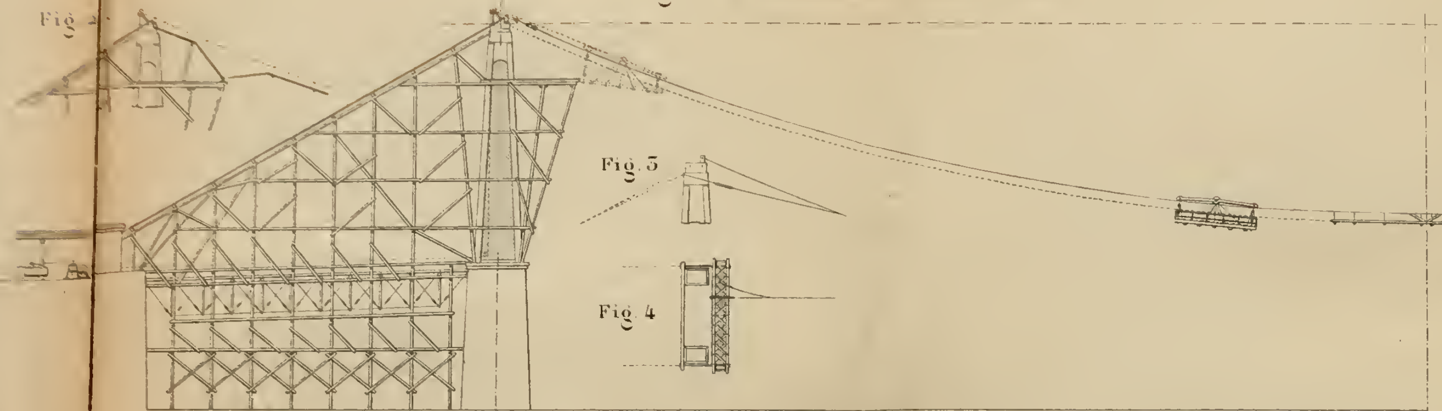
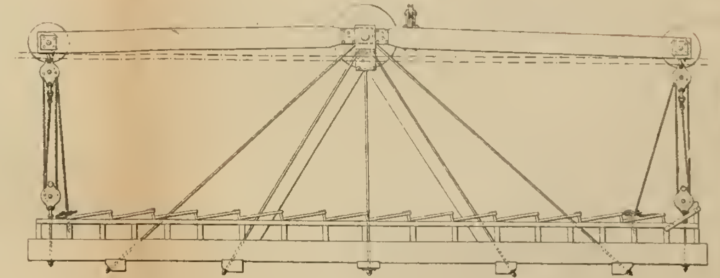
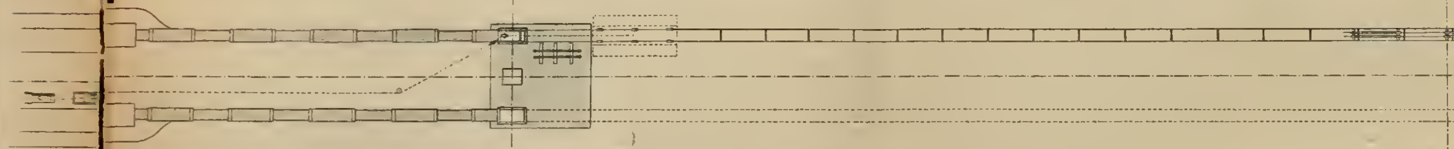
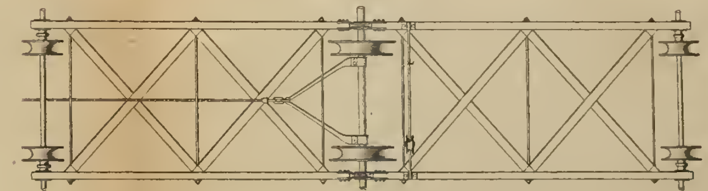


Fig. 11. Demi coupes horiz.les



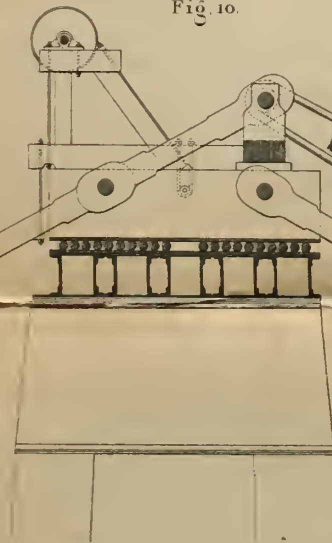


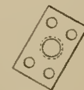


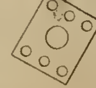


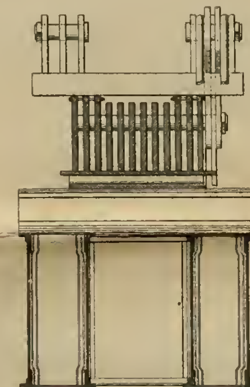
Détails du mode d'attache sur les selles du câble servant à établir la chaîne de suspension

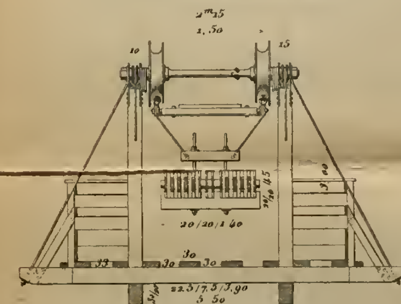












Gravé par E. Perot

Fig. 1. Développement et projections de la douelle et des lignes de lits

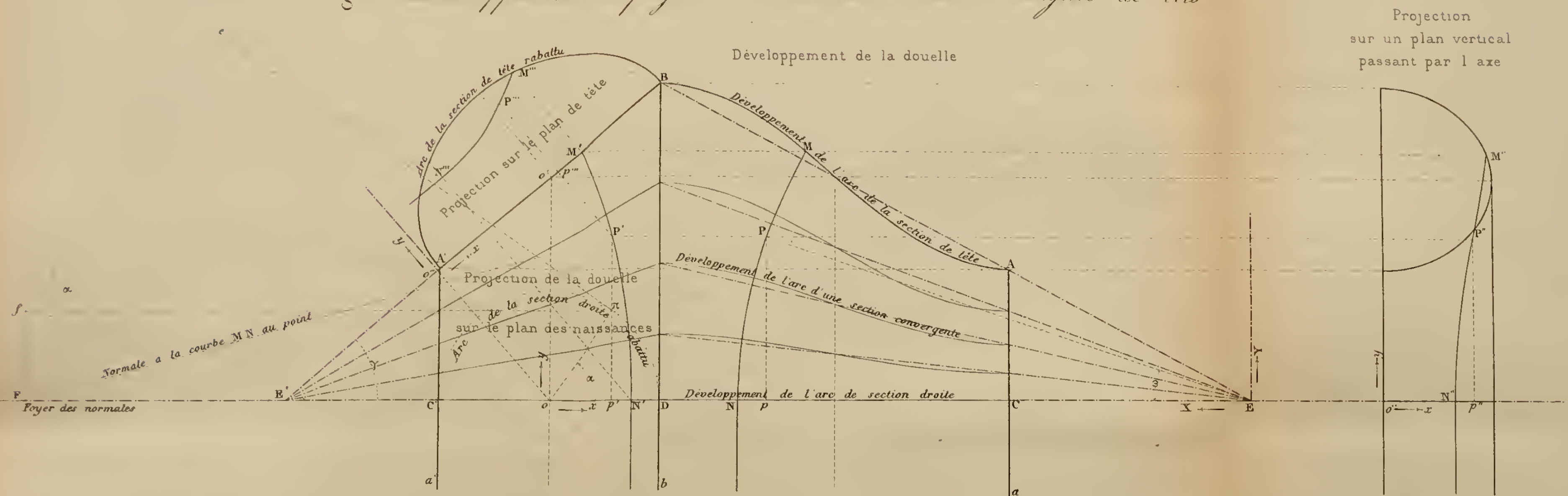


Fig. 2.

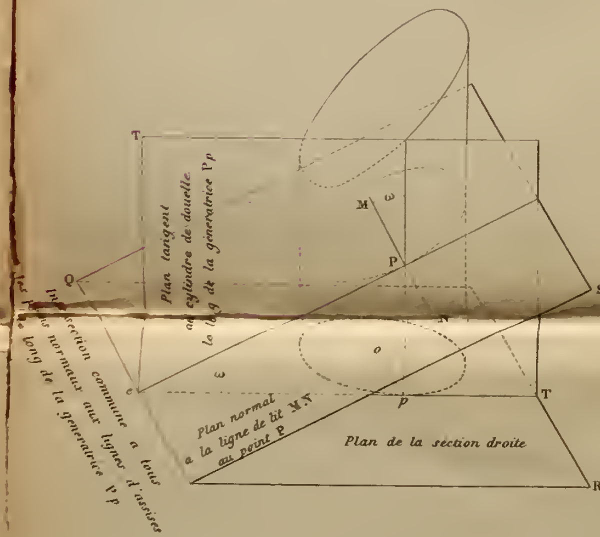
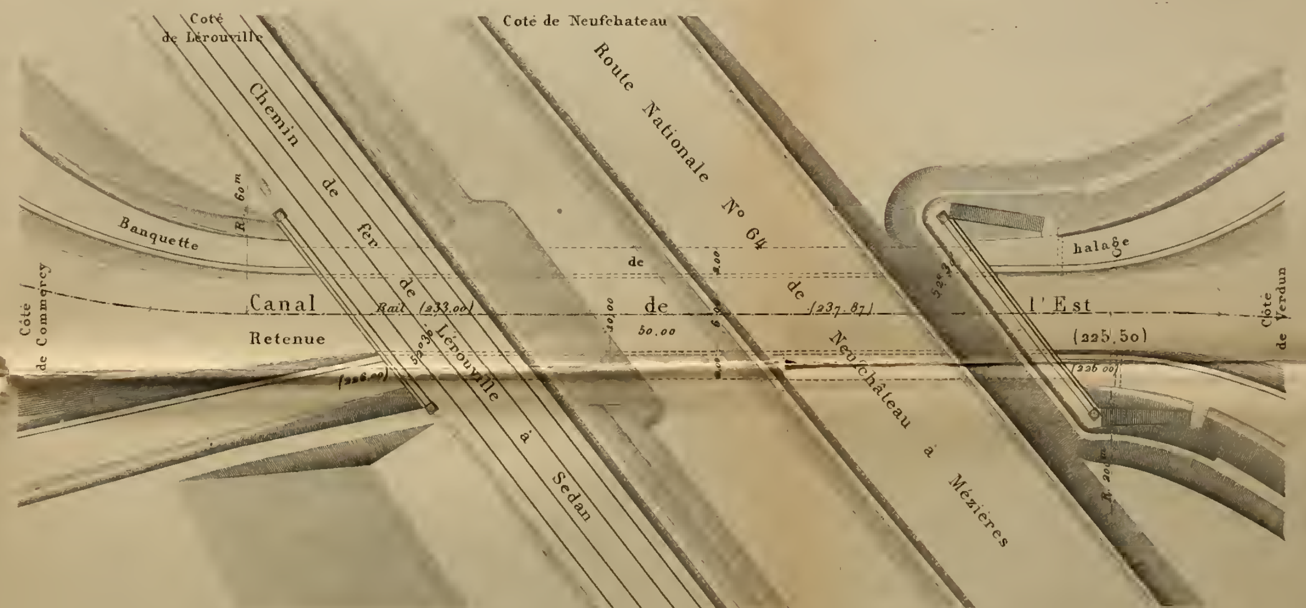


Fig. 3. Plan général du pont souterrain des Kœurs



Echelle de 0m002 pour 1m $\frac{1}{500}$



Gravé par E. Pérot

Application au pont souterrain des Kœurs (Canal de l'Est)

Fig. 1. Coupe longitudinale

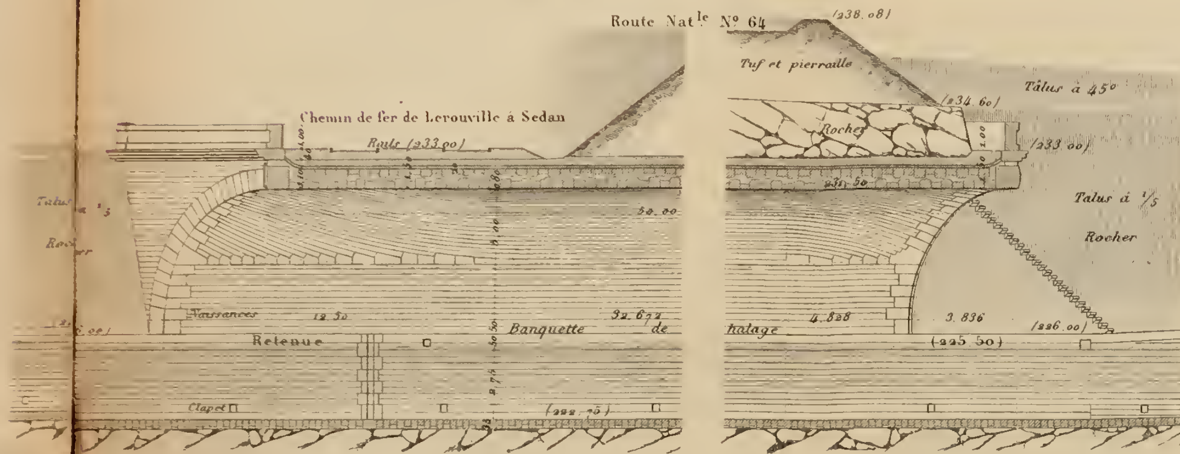


Fig. 2. Élévation de la tête d'aval

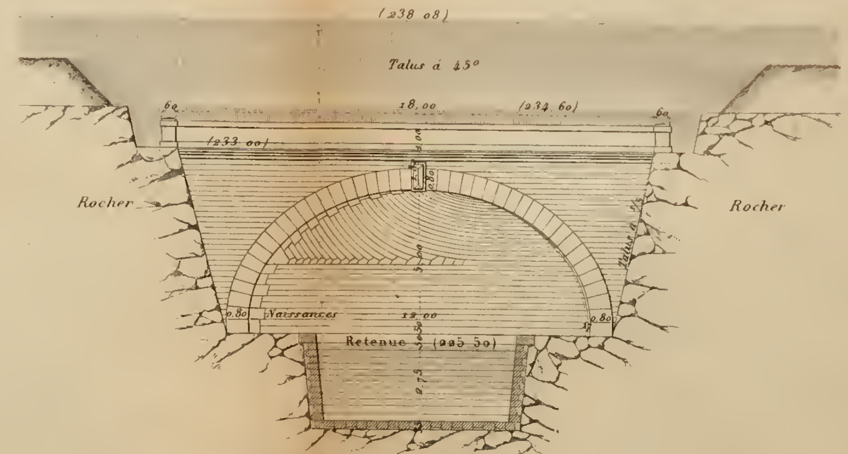


Fig. 3. Développement de la douelle

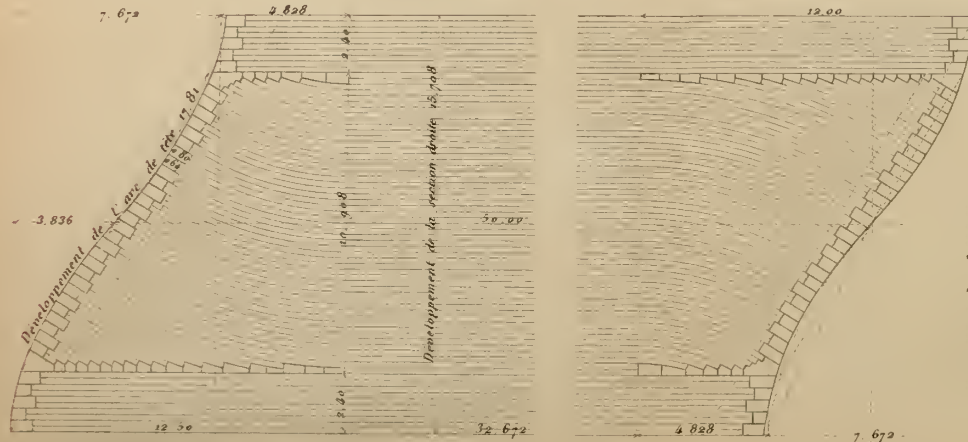


Fig. 5. Coupe transversale et élévation d'une ferme des cintres en section droite

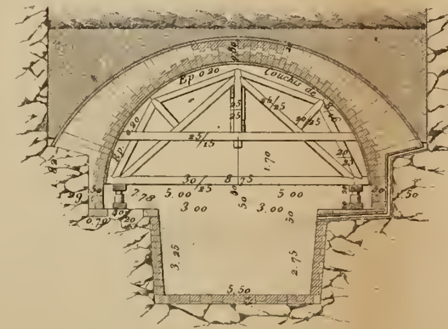


Fig. 6. Élévation d'une ferme de tête des cintres

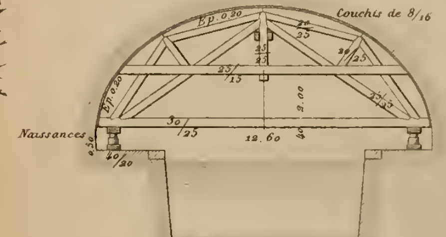


Fig. 4. Projection horizontale de la douelle

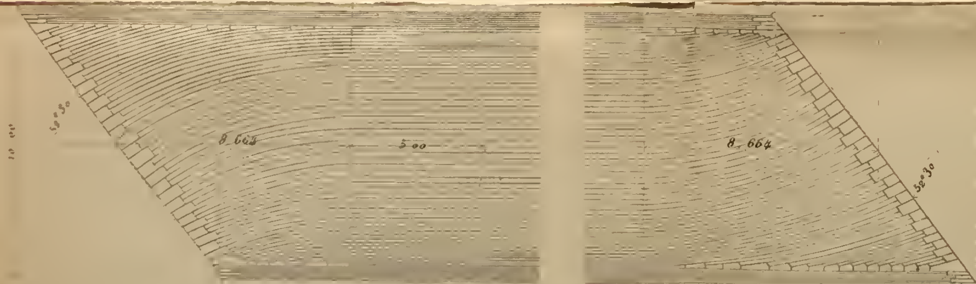
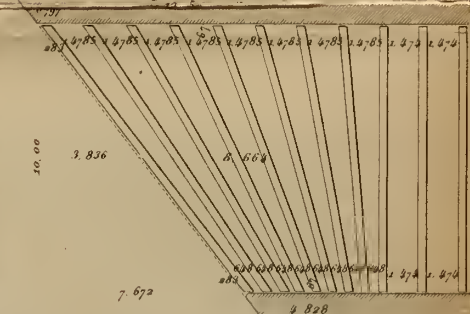


Fig. 7. Plan des cintres



Taille des voussoirs

Fig. 8. Perspective d'un voussoir

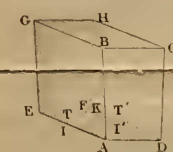
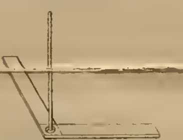


Fig. 9. Equerre à trois branches



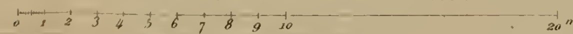
Perspective des voussoirs

entre les joints de rupture: angle obtus, Fig. 10. angle aigu, Fig. 11.

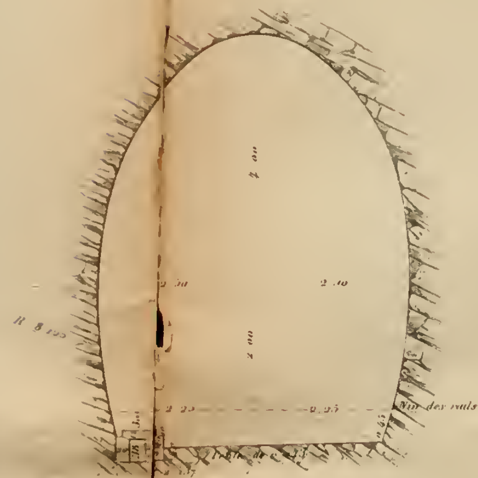
des joints de rupture: angle obtus, Fig. 12. angle aigu, Fig. 13.



Echelle des Fig. 1 à 7 0m004 pr 1m (1/250)



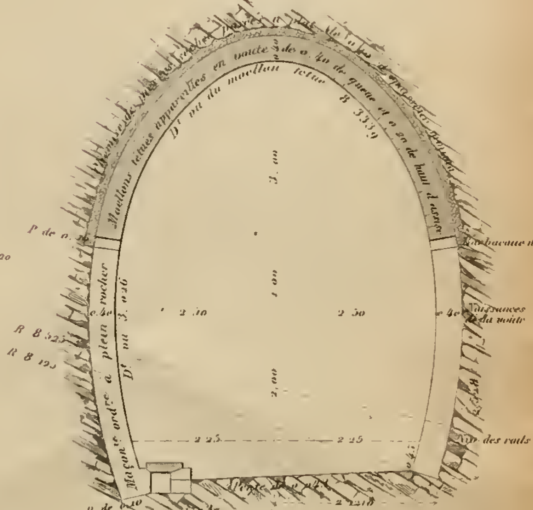
A Fig. 1. Type sans revêtement (N° 0)



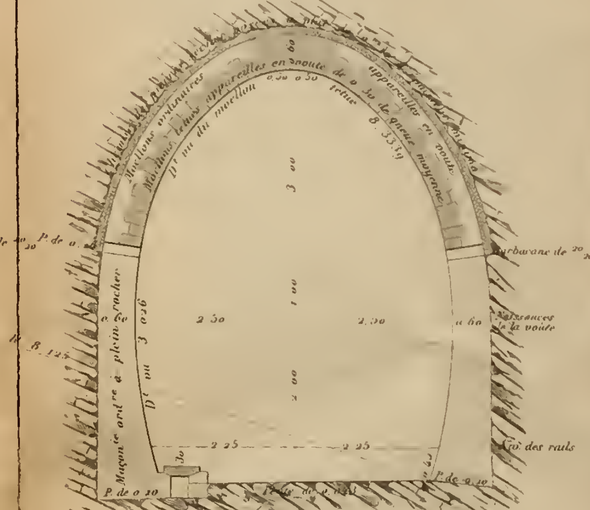
A Fig. 2. Type revêtement partiel [redacted]



A Fig. 3. Type avec revêtement de 0m 70 (N° 1)



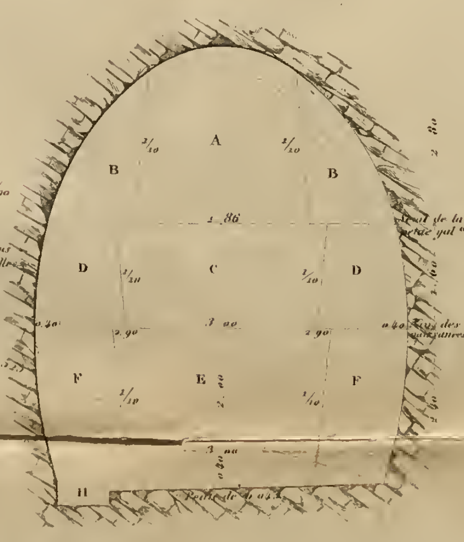
A Fig. 4. Type avec revêtement de 0m 60 (N° 2)



A Fig. 5. Exécution partielle du souterrain à 2 voies



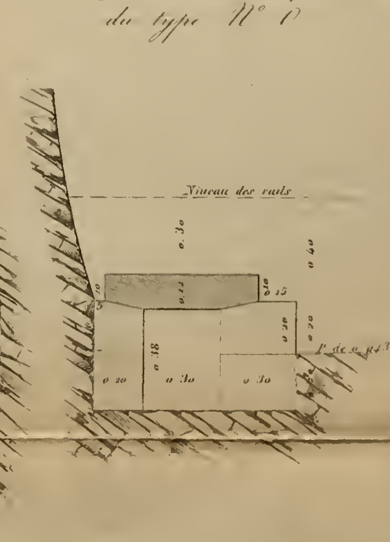
A Fig. 6. Indication des divers déblais d'un souterrain à voie unique



A Fig. 7. Indication des divers déblais de l'exécution partielle à 2 voies



B Fig. 8. Détail de l'aqueduc du type N° 0



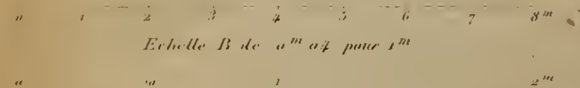
Légende de la Fig 6

A Galerie de reconnaissance
B Abattage au large de la petite galerie
C Fonçage de la cunette du petit strosse
D Abattage au large du petit strosse
E Cunette du grand strosse
F Reprise en sous œuvre des piedroits
H Reglement et aqueduc

Légende de la Fig 7

A Galerie d'avancement
B Abattage au large de la petite galerie
C Cunette du petit strosse
D Abattage au large du petit strosse
E Cunette du grand strosse
F Reprise en sous œuvre des piedroits
G Abattage du strosse
H Reglement et aqueduc
E' Abattage du grand strosse } à déblayer ultérieurement
F' Reprise en sous œuvre des piedroits } à déblayer ultérieurement
I Réglement

Echelle A de 0m 01 pour 1m



Echelle B de 0m 04 pour 1m

Gravé par E. Pérat


UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 085684931